

DLST-UJF

Licence 2ème année

UE : Physique 236

Autour de la photographie numérique

Thèmes étudiés :

Photographie

Photométrie

Colorimétrie

Année 2013/2014

Martial Balland
martial.balland@ujf-grenoble.fr
Antoine Delon
antoine.delon@ujf-grenoble.fr
Sylvie Zanier
sylvie.zanier@ujf-grenoble.fr

Autour de la photo numérique

Les séances

Ce module se déroule en 7 séances de 4 heures. Le point commun de ces séances est l'imagerie photographique, incluant les aspects formation des images, éclairage et détection du rayonnement. Plus précisément, les contenus sont les suivants :

La préparation des séances

Chaque séance comporte des exercices préparatoires faits et rendus *individuellement au début de la séance*. Ils sont nécessaires à une bonne compréhension du travail demandé pendant la séance. Il est aussi nécessaire de lire attentivement les énoncés avant la séance.

Les comptes rendus

Les séances donnent lieu à un compte rendu par binôme. Ce compte rendu sera donné à l'enseignant au début de la séance suivante. Il sera évalué par votre enseignant.

Déroulement du projet photographique

Vous trouverez, p. 53 de ce polycopié, une série de propositions de thèmes d'étude concernant la photographie. Ces études pourront concerner la réalisation d'un appareil photographique proprement dit, des problèmes d'optique posés pour la réalisation de photographies spécifiques, les traitements d'image possibles… Vous aurez le temps de choisir un sujet dans la liste proposée, mais vous aurez aussi la possibilité de proposer votre propre sujet, en vérifiant avec l'enseignant la pertinence et la réalisation possible de celui-ci. Enfin, ci-besoin est, vous aurez la possibilité d'emprunter les appareils photo numériques réflex de la 4ème séance pour réaliser les photographies nécessaires à l'illustration de votre projet. Avant d'arriver à cette séance, vous devrez donc avoir réfléchi précisément à votre projet photographique…

Vous ferez un exposé de votre projet, au cours d'une séance supplémentaire, devant vos enseignants et vos camarades. Ne restez pas, au cours de cet exposé, dans le descriptif et les généralités, mais tenez-vous à une démarche scientifique et pédagogique. Vous avez la possibilité de compléter votre exposé avec quelques pages écrites détaillant des aspects plus quantitatifs de votre travail.

Etude n°1 :
Les lentilles minces convergentes et divergentes

I. Etude préparatoire

I.1. Remplir le tableau suivant :

$p = \overline{OA}$, $p' = \overline{OA'}$ où O est le centre de la lentille ou le sommet du miroir et A et A' sont les positions respectives d'un point objet et de son image sur l'axe optique orienté de l'espace objet vers l'espace image .

Elément simple	Relation de conjugaison	Vergence	Grandissement transversal
Miroir sphérique rayon de courbure R			
Lentille de distance focale f'			

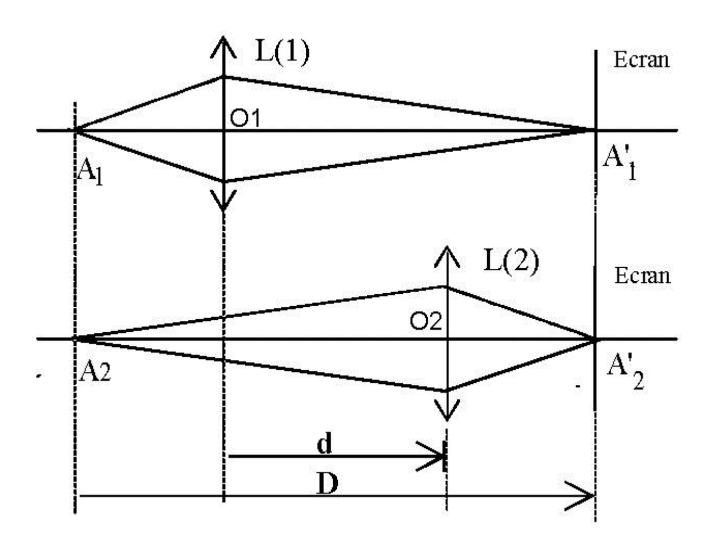
I.2. Construire l'image d'un objet AB placé perpendiculairement à l'axe principal à travers une lentille mince convergente pour les trois cas suivants :

AB situé dans l'espace objet réel, entre $-\infty$ et le foyer objet F.
AB situé dans l'espace objet réel, entre F et le centre optique O de la lentille.
AB situé entre le centre optique et le foyer image F'.

I.3. Recommencer pour une lentille mince divergente

AB situé dans l'espace objet réel, entre $-\infty$ et le foyer image F'.
AB situé dans l'espace objet réel, entre F' et le centre optique O de la lentille.
AB situé entre le centre optique et le foyer objet F.

I.4. Méthode de Bessel



Soit une lentille mince convergente de distance focale f'.

❖ Monter que, lorsque la distance D entre l'objet et l'écran est supérieure à 4f, il existe deux positions séparées de d donnant chacune une image réelle. Pour cela, on utilisera la formule de conjugaison en exprimant p et p' en fonction de D-d et D+d.

❖ Connaissant D et d, démontrer que $f' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$.

II. Détermination des distances focales d'une lentille convergente et d'une lentille divergente.

II.1. Recherche des foyers d'une lentille convergente:

Faire l'image d'un objet en plaçant une lentille (f≈10cm) au milieu du banc d'optique.

- ❖ suivre l'image lorsque l'objet s'éloigne de la lentille et rechercher la position du foyer image.
- ❖ suivre l'image lorsque l'objet se rapproche de la lentille et rechercher la position du foyer objet.
- ❖ En déduire les valeurs des distances focales de la lentille.
- ❖ Cette méthode est-elle adaptée à une mesure de distance focale f≈50cm ? Quelle critique peut-on apporter à cette méthode ?

II.2. Méthode d'autocollimation

II.2.1. Etude d'une lentille convergente

Il s'agit d'une application du principe de retour inverse de la lumière. On place derrière la lentille mince convergente un miroir plan et on déplace la lentille sur le banc.

- ❖ Pour une certaine position de la lentille, observer que l'image est nette dans le même plan que l'objet et que le grandissement est - 1.
- ❖ En déduire alors la position particulière de la lentille.
- ❖ Justifier ce résultat par un schéma.
- ❖ Quelle est la précision de mesure ?

- Montrer que le résultat ne dépend pas de la position du miroir.
- Mesurer les distances focales des différentes lentilles par cette méthode.

II.2.2. Etude d'une lentille divergente

Pour appliquer la méthode d'autocollimation à une lentille divergente, on lui accole une lentille convergente de distance focale connue. Il est impératif que l'ensemble soit convergent. Par la méthode d'autocollimation on détermine alors la distance focale de cet ensemble de deux lentilles par la formule de Gullstrand. Cette formule s'écrit : $\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1^{'}} + \frac{1}{f_2^{'}} - e\frac{1}{f_1^{'}f_2^{'}}$ où *e* est la distance entre les centres optiques des deux lentilles.

Dans notre cas, les lentilles sont accolées et donc e *= 0mm*

- L'ensemble doit être convergent, quelle condition cela implique-t-il sur la distance focale de la lentille convergente ?
- Déterminer la distance focale de la lentille divergente à disposition en expliquant votre démarche.

III. Méthodes de Bessel et de Silbermann

III.1. Méthode de Bessel :

- Choisir une lentille mince convergente de distance focale connue et vérifier que pour une distance objet - écran D > 4f, il existe deux positions séparées donnant une image réelle avec des grandissements inverses.
- Interpréter.
- Utiliser les résultats de votre préparation pour en déduire la distance focale d'une des lentilles convergentes que vous avez à votre disposition.
- Que pensez-vous de la précision de la mesure.

III.2. Méthode de Silbermann:

- Observer que pour une distance objet - écran D = 4f', il y a position unique de la lentille mince convergente donnant une image réelle d'un objet réel.
- Quel est alors le grandissement ?
- Vérifier ce résultat par le calcul et par une construction graphique.
- Quel est l'intérêt de la méthode de Silberman ?
- Vérifier que pour D < 4 f, il n'y a pas d'image réelle.

Déterminer expérimentalement la distance focale d'une des lentilles convergentes mis à disposition, par cette méthode.

III.3. Technique « globale » :

- Plutôt que de calculer f en se basant sur une distance unique, D, entre les deux lentilles (cas des deux précédentes méthodes), vous pouvez mesurer d pour toute

une série de valeurs de D. Un ajustement de d^2 en fonction de D, donne alors f. Commentez cette technique, notamment en terme de précision, par rapport aux deux précédentes.

IV. Mesures de la distance focale d'une lentille divergente en utilisant les formules de conjugaison.

Une lentille divergente donne toujours d'un objet réel, une image virtuelle, que l'on ne peut donc pas visualiser directement sur un écran. C'est ce qui empêche de mesurer sa distance focale aussi simplement qu'avec une lentille convergente. On vous propose ici, d'établir un protocole expérimental pour pouvoir mesurer la distance focale d'une lentille divergente en utilisant les formules de conjugaison dans deux situations :

- *on forme un objet réel vis-à-vis de la lentille divergente*, dont l'image virtuelle sert d'objet virtuel pour une lentille convergente connue, qui en fait une image réelle dans la configuration 4f (jouant ainsi le rôle d'un «œil fictif»).
- *on forme un objet réel vis-à-vis d'une lentille convergente connue en configuration 4f*, dont l'image virtuelle, située entre le centre optique et le foyer objet de la lentille divergente, forme une image réelle.

Pour chaque situation, vous devez :

- établir le protocole expérimental pour faire la mesure
- expliquer ce protocole en réalisant le tracé des rayons lumineux
- réaliser la mesure de la distance focale de la lentille divergente sur le banc optique

Attention, dans cette partie il n'est pas strictement nécessaire de respecter la condition de Silbermann (D = 4f) pour la lentille convergente ; la démarche consiste à utiliser un couple de positions connues objet-image afin de positionner l'objet ou l'image de la lentille divergente (l'image ou l'objet respectif étant réels et donc directement observables).

V. Différencier une lentille convergente d'une lentille divergente

Plusieurs méthodes permettent de distinguer ces deux types de lentilles :

- comparer les épaisseurs au niveau de l'axe optique puis au niveau des bords, pour une lentille convergente, puis pour une lentille divergente. Conclusion.
- regarder un objet très proche à l'aide d'une lentille convergente puis d'une lentille divergente. Comparer les grandissements. Conclusion.
- regarder un objet très proche en déplaçant transversalement une lentille convergente, puis une lentille divergente (dans ce dernier cas prendre une lentille très divergente pour que l'effet soit net). Dans chaque cas, observer comment se déplace l'image par rapport à l'objet. Faire les schémas correspondants. Conclusion.

Etude n°2 :
Construction d'un téléobjectif

I. Introduction:

L'**objectif photographique** est un système *optique* convergent formé de plusieurs lentilles, qui a pour but de former des images réelles sur le capteur de l'appareil photographique. Un objectif se caractérise par sa *distance focale*, son ouverture relative, son angle de champ (qui définit la surface sensible maximale utilisable). La quantité de lumière sortant de l'objectif est toujours plus faible que la quantité de lumière y entrant. L'une des qualités d'un objectif est de perdre le moins de lumière possible, c'est-à-dire que le taux de quantité de lumière sortante sur la quantité de lumière entrante demeure le plus proche possible de 100%. De plus, la trajectoire des rayons lumineux à travers l'objectif jusqu'au capteur ne doit pas dépendre de la couleur et la forme des objets photographiés doit être respectée.

Un **téléobjectif** est un *objectif* à longue *focale*. L'effet de cette longue focale est de former une image d'un objet éloigné aussi grande que possible ou, plus précisément, de permettre un cadrage beaucoup plus serré par un angle de vision étroit (angle de champ ou champ angulaire). Il n'y a pas de définition précise de la focale minimale à partir de laquelle on doit parler de téléobjectif, mais on part généralement du principe que tous les objectifs ayant un angle de vision plus étroit que la perception naturelle de l'œil humain entrent dans cette catégorie. Par référence au film argentique 24/36 *mm*, on considère que cela correspond à des *focales* supérieures à 50 mm ou 55 mm. Le 90 mm est souvent utilisé pour les portraits, permettant à la fois de prendre un certain recul (et d'avoir donc des modèles plus naturels) et d'éviter les déformations dues à une trop grande proximité du visage. Le 135 mm est encore meilleur pour des portraits sur le vif, des modèles particulièrement timides ou un photographe qui tient à se faire oublier un peu de son modèle. Les focales de 170 mm à 250 mm commencent à permettre la chasse photographique. Les objectifs de 1000 mm demandent un affût spécial et obligent le plus souvent à utiliser un pied photographique.

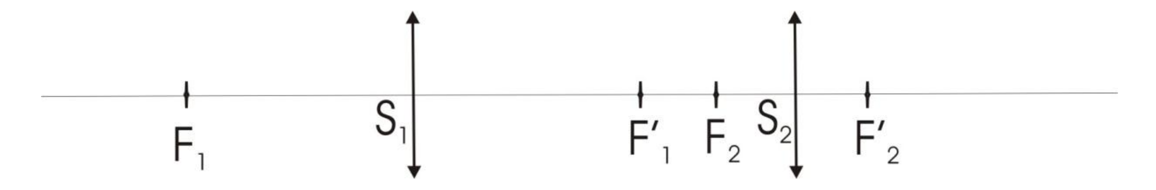
L'une des qualités d'un téléobjectif, dont on va illustrer le principe au cours de cette séance est liée à son encombrement. On définit l'encombrement d'un système optique convergent par la distance entre le premier élément du système optique et son plan focal image. On veut un grandissement le plus grand possible, avec le plus faible encombrement. Pour cela, on associe plusieurs lentille et on va comparer l'encombrement de cette association par rapport à une seule. Pour une lentille mince convergente de centre optique S et de foyer focal image F', l'encombrement est la distance $\overline{SF'} = f'$, soit la distance focale image de la lentille. Pour un objectif photographique, l'encombrement correspond à la

distance entre la première lentille de l'objectif et le capteur qui doit contenir l'image finale à travers le téléobjectif d'un objet situé à l'infini.

II. Théorie :

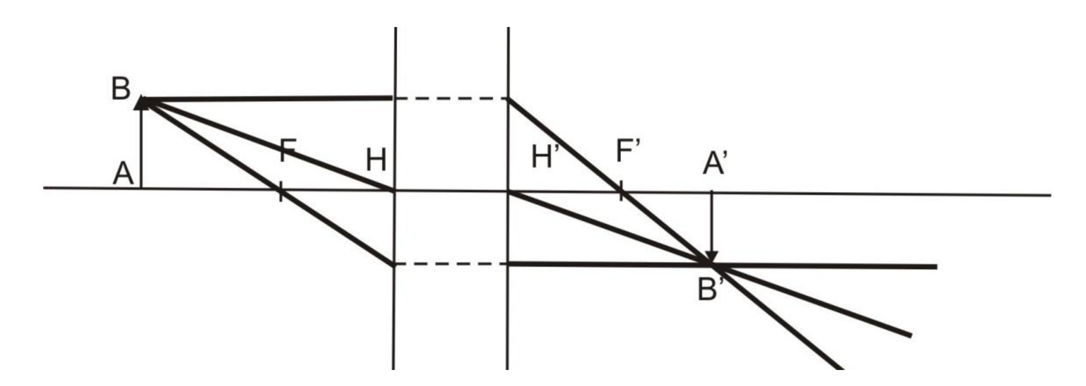
Le téléobjectif « école » que nous allons réaliser au cours de la séance TP est composé par l'association de deux lentilles : une lentille convergente L_1 suivie d'une lentille divergente L_2.

Dans ce paragraphe nous allons rappeler les différentes lois correspondant au doublet de lentilles que l'on prendra convergente. On désigne par S_1 et S_2 les centres optiques respectifs des deux lentilles L_1 et L_2, de foyers objets respectifs, F_1 et F_2 et de foyers images respectifs F_1' et F_2'. $e = \overline{S_1S_2}$ est la distance entre les deux lentilles. Attention, ici l'épaisseur e > 0.



On note encore $f_1 = \overline{S_1F_1}$, $f_1' = \overline{S_1F_1'}$, $f_2 = \overline{S_2F_2}$ et $f_2' = \overline{S_2F_2'}$.

Nous allons nous intéresser aux caractéristiques globales de ce système de lentilles qui peut être modélisé par la connaissance de ces foyers objet F et image F' ainsi que par la position des plans principaux objet H et image H' (attention, si l'un au moins des milieux extrêmes n'est pas de l'air, les formules et tracés de rayons sont différents et il faut introduire des plans dits nodaux).



La connaissance de la position de ces différents éléments nous permet de savoir comment les rayons lumineux vont être affectés par l'association de lentilles. Comme pour une lentille mince, on s'appuiera sur trois types de rayons. Tout rayon objet parallèle à l'axe optique ressortira à la même hauteur par le plan H' et passera par F'. Tout rayon objet passant par F et croisant H, ressortira parallèle à l'axe optique et à la même hauteur dans le plan principal image H'. Tout rayon qui passe par le centre de H, ressortira parallèle mais en passant par le centre de H'.

La distance focale objet de l'association de lentilles est alors la distance $f = \overline{HF}$ et la distance focale image de l'association est $f' = \overline{H'F'}$. On utilise la formule de Gullstrand pour déterminer la position des différents éléments H, F, H' et F' d'un doublet de lentilles:

$$\frac{1}{f^{'}} = \frac{1}{f_1^{'}} + \frac{1}{f_2^{'}} - \frac{e}{f_1^{'} f_2^{'}}$$

Nous introduisons l'intervalle optique $\Delta = \overline{F_1^{'}F_2}$. On a donc $f'_1 + \Delta + f'_2 = e$, de sorte que la formule de Gullstrand peut se réécrire :

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta} \text{ et } f' = -\frac{f_1^{'} f_2^{'}}{\Delta}$$

La relation de conjugaison pour une association de lentilles est :

$$\frac{1}{\overline{H'A'}} - \frac{1}{\overline{HA}} = \frac{1}{f'} \text{ ou } \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'}$$

Il est aussi intéressant de déterminer la position des plans principaux H et H' par rapport aux positions des centres optiques des lentilles $S_1 \; et \; S_2$:

$$\overline{S_1H} = \frac{f_1 e}{\Delta} \text{ et } \overline{S_2H^{'}} = \frac{f_2^{'} e}{\Delta}$$

On en déduit la position du foyer objet F et du foyer image F', par rapport aux positions des centres optiques des lentilles $S_1 \; et \; S_2$:

$$\overline{S_1F} = \frac{f_1(f_2 + e)}{\Delta} \; et \; \overline{S_2F'} = \frac{f_2^{'}(e - f_1^{'})}{\Delta}$$

Une dernière caractéristique qui va nous intéresser est le grandissement :

$$\gamma = -\frac{f}{f^{'}} \frac{\overline{H^{'}A^{'}}}{\overline{HA}} = -\frac{f}{f^{'}} \frac{p'}{p} = p'/p$$

Remarque : Il existe une convention permettant de représenter un doublet de lentille avec 3 entiers (n,p,q) tels que :

$$\frac{n}{f_1^{'}} = \frac{p}{e} = \frac{q}{f_2^{'}} = a$$

où a est une constante.

III. Etude préparatoire

Cette étude préparatoire est indépendante de la partie théorique précédente. Il s'agit ici d'établir les différentes formules utiles au TP.

III.1. Exercice 1 : Tracé de rayons

Soit une lentille épaisse ou une association de lentilles caractérisé par un plan principal objet et un plan principal image séparé de 10 cm et une distance focale f' = 15 cm.
Construire l'image d'un objet AB placé perpendiculairement à l'axe principal à travers cet élément optique pour les trois cas suivants :

- ❖ AB situé dans l'espace objet réel, au-delà du foyer objet F.
- ❖ AB situé dans l'espace objet réel, entre F et le plan principal objet.
- ❖ AB situé dans l'espace au-delà du plan principal image.

III.2. Exercice 2 : Etude d'un téléobjectif

On va étudier un téléobjectif constitué d'une lentille convergente L_1 de distance focale $f_1^{'} = 20$ cm suivie d'une lentille divergente L_2 de focale $et\ f_2^{'} = -30$ cm. Les centres optiques respectifs des deux lentilles sont S_1 et S_2. Ils sont séparés de la distance e = 10 cm.

Rappeler les conditions sur la position de l'objet d'une lentille divergente pour que l'image de cet objet soit réelle

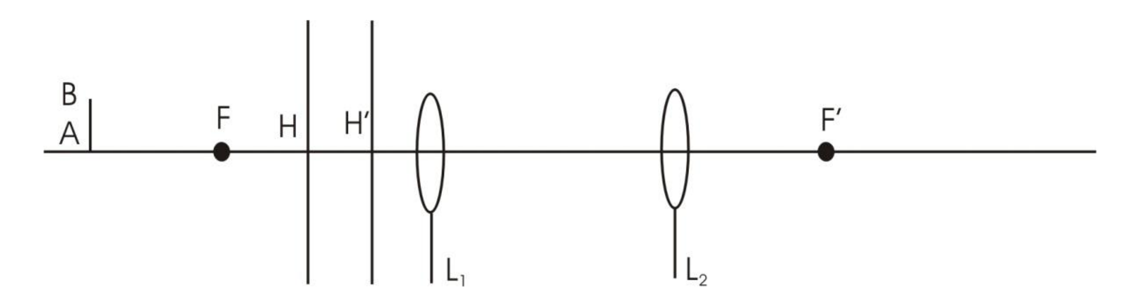
Dans un premier temps, on recherche la position du foyer image F' du doublet de lentille. Pour cela on considère un objet AB à l'infini. A_1B_1 est l'image de cet objet obtenu à travers la lentille convergente L_1. Il sert d'objet virtuel pour la lentille divergente L_2. L_2 donne de cet objet virtuel une image réelle agrandie A_2B_2 situé par définition dans le plan du foyer image F' du doublet.

Calculer $\overline{S_1A_1}$, la position de l'image à travers la lentille L_1 de l'objet $\overline{AB}$ situé à l'infini à partir de la relation de conjugaison de la lentille L_1.
Calculer $\overline{S_2A_2}$, la position de l'image à travers la lentille L_2 de l'objet à partir de la relation de conjugaison de la lentille L_2. En déduire la position du foyer image F' du doublet.
Faire un schéma de principe de ce téléobjectif et tracer le trajet des rayons lumineux.
En déduire l'expression de l'encombrement $E = \overline{S_1A_2}$.
Comment se compare l'encombrement de ce système composé avec celui d'une unique lentille mince qui aurait la même focale (calculée avec la formule de Gullstrand).

IV. Manipulation

Vous disposez de 3 lentilles convergentes L_0, L_1, et L_3 et d'une lentille divergente L_2 de distance focale $f_2' = -30cm$. On repère les 3 lentilles convergentes L_0, L_1, L_3 de sorte que $f_0' < f_1' < f_3'$ (on a des focales d'environ 10, 20 et 50 cm).

Le but de la manipulation est de comprendre comment on mesure la distance focale d'un doublet de lentille, d'une lentille épaisse ou du téléobjectif d'un appareil photo (en fait, de tout système optique convergent). Notre système optique convergent sera un doublet de deux lentilles, une lentille convergente L_1, suivie d'une lentille divergente L_2, espacée d'une distance de 10 cm. **Attention**, H et H' ne sont pas les plans des lentilles et rien ne permet de savoir où ils sont situés *a priori*.



1. **1.** Mesurer les distances focales images des 3 lentilles convergentes par la méthode d'autocollimation (une mesure est l'ensemble de la valeur de la distance focale et de son incertitude). Identifier les 3 lentilles. Donner l'incertitude pour vos différentes mesures.
2. **2.** Mesurer par auto-collimation la distance focale de la lentille divergente en accolant à celle-ci une lentille focale convergente. Donner l'incertitude sur votre mesure.
3. **3.** Créer une image à l'infini, d'un objet AB, à l'aide de la lentille convergente L_0 et de la lampe équipée du cache. Expliquer votre démarche.
4. **4.** Cette image à l'infini servira d'objet à l'infini pour le téléobjectif, constitué de la lentille convergente L_1 suivie de la lentille divergente L_2 avec une distance *e* de 10 cm. On note A'B' l'image par le téléobjectif de cet objet à l'infini. En déduire la position $\overline{S_2F'}$ du plan focal image du téléobjectif par rapport au centre optique S_2 de la lentille L_2.
5. **5.** Enlever la lentille L_0 et faire l'image, A"B", du cache AB de la lampe à l'aide du système « téléobjectif », (c'est à dire en gardant e = 10 cm) positionné de telle sorte que le grandissement du téléobjectif soit -1. Noter la distance $\overline{S_2A''}$ entre le plan de cette image et le centre S_2 de la lentille L_2.
6. **6.** Théoriquement, quelle est alors la distance $\overline{H'A'}$ entre le plan principal image H' et l'image A'B' dans le cas de l'expérience n°4, ainsi que la distance $\overline{H'A''}$ entre le plan principal image H' et l'image A"B" dans le cas de l'expérience n°5 ?
7. **7.** Faire un schéma à l'échelle où sont rassemblés les résultats de vos deux mesures précédentes (en incluant notamment les objets AB et A"B").
8. **8.** En déduire la distance focale du téléobjectif, avec son incertitude.

9. Sur votre schéma précédent, reporter les positions des plans principaux H et H'.

10. Calculer la distance focale à partir de la formule de Gullstrand. Vérifier que c'est en accord avec la construction et vos mesures aux incertitudes près.

11. Déterminer l'encombrement du téléobjectif, soit la distance lentille convergente-plan focal image.

12. Déterminer la distance focale d'une lentille convergente équivalente à ce doublet (qui donne le même grandissement).

13. Quel est l'intérêt d'utiliser le téléobjectif plutôt que la lentille convergente équivalente?

14. Reprendre la même démarche pour mesurer la distance focale d'un objectif photographique, réglé à la plus grande focale et à la plus grande ouverture possibles (la bague de mise au point étant réglée sur l'infini).

15. Comparer cette mesure à la distance focale attendue.

Etude n°3 :
Aberration et photographie (Cours TD et TP)

I. Etude préparatoire

Exercice: les aberrations chromatiques

L'aberration chromatique apparaît lorsque la source lumineuse n'est pas monochromatique. Elle est due au fait que l'indice de réfraction n d'un matériau dépend de la longueur d'onde de la lumière, c'est le phénomène bien connu de dispersion de la lumière qui peut être observé à travers un prisme. Pour le verre qui constitue nos lentilles, on suppose que l'indice de réfraction suit la loi de Cauchy suivante :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \text{ avec A = 1,606 et B = 6,545 } 10^{-15} \text{ m}^{-2}$$

On rappelle que la distance focale d'une lentille de rayons de courbure (algébriques), r_1 et r_2, est donnée par :

$$\frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

Considérons une lentille convergente biconvexe de rayon de courbure r_1 = 1000 mm et r_2 = -1000 mm.

1. Déterminer la distance focale f' pour une longueur d'onde bleue $\lambda = 450$ nm, une longueur d'onde jaune $\lambda = 580$ nm et une longueur d'onde rouge $\lambda =$ 700 nm. Tracer f' en fonction de λ.
2. On dispose d'une lentille de distance focale égalé à 20 cm et de filtres spectraux étroits qui ne laissent passer que des longueurs d'onde de 436 (ou 501) nm et de 652 nm. De combien varie la distance focale entre ces deux valeurs ? Décrire précisément l'expérience que vous réaliserez en TP pour mesurer la variation de f'.

II. Cours sur transparent avec polycopié

III. Manipulations

III.1. Les aberrations chromatiques

Pour mettre en évidence les aberrations chromatiques, utiliser une lentille simple non corrigée de distance focale environ 20 cm. Former l'image nette d'un petit objet F placé au point de convergence d'une lampe quartz-halogène. Faire la mise au point sur un écran mobile situé à plus d'1 m de la lentille. Orienter et éventuellement diaphragmer légèrement la lentille pour minimiser les aberrations géométriques. Remplacer ensuite l'objet F par un trou de petites dimensions.

Placer un filtre coloré à un endroit où il ne diaphragme pas le faisceau et repérer avec soin la position de l'image correspondante. Procéder de la même façon avec une autre couleur et déduisez-en la variation de la distance focale, suivant le protocole que vous avez défini à la 2ème question de l'exercice préparatoire. Déduisez-en une valeur approximative de la constringence $A = f'/\Delta f' = (n_{588} - 1)/(n_{487} - n_{656})$.

Enlever le filtre et translater l'écran parallèlement au banc optique. Observer la couleur des bords du faisceau lumineux et expliquer l'ordre des couleurs observées.

Attention à l'alignement : si celui-ci est bien réalisé, votre image doit avoir la symétrie cylindrique. Si ce n'est pas le cas, contrôler votre alignement.

III.2. Les aberrations géométriques

III.2.1. Les aberrations de sphéricité

Pour étudier l'aberration sphérique, on réalise l'expérience en prenant un objet ponctuel situé sur l'axe et une lentille fortement bombée et de grand diamètre. On réalise l'image d'un trou fin à l'aide de cette lentille sur un écran. Pour faire disparaître l'aberration chromatique, on peut utiliser un filtre coloré.

- Observer l'influence du sens de la lentille.
- Observer l'influence de surface éclairée de la lentille.
- Se placer dans les conditions d'aberrations sphériques les plus importants, et déplacer l'écran.
- Expliquer vos observations.
- Que peut-on en déduire en ce qui concerne la réfraction des rayons paraxiaux et marginaux ?

III.2.2. La distorsion

- Un faisceau de lumière parallèle éclaire un objet étendu (grille).
- Diaphragmer la lentille et chercher l'image de la grille.
- Déplacer ensuite le diaphragme entre l'objet et la lentille, puis entre la lentille et l'écran et observer les déformations du quadrillage.
- Par des schémas simples, expliquer la déformation en barillet (diaphragme situé entre l'objet et la lentille) et la déformation en coussinet (diaphragme situé entre la lentille et l'écran).

III.2.3. La profondeur de champ

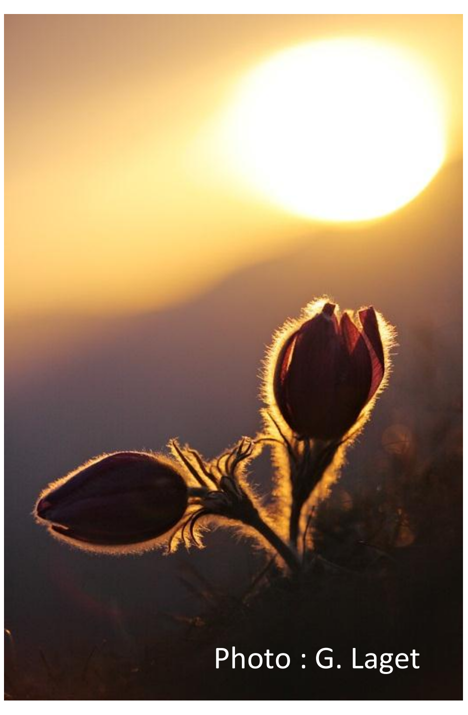
- Positionner l'objet et l'écran de façon que leur distance soit supérieure à 4f', f' étant la distance focale de la lentille convergente utilisée. Vérifier qu'ils existent deux positions de la lentille pour lesquelles on obtient une image nette de l'objet. Pour chacune des images obtenues, déterminer expérimentalement la latitude de mise au point par déplacement de la lentille. Conclusion.

- **Variation de la profondeur de champ avec le diaphragme**
  Pour un couple donné lentille-écran, déterminer expérimentalement la profondeur de champ pour les différents diaphragmes. Conclusion

- **Variation de la profondeur de champ avec la focale**
  On dispose d'une lentille convergente L_1 de focale $f_1^{'}$ = 20 cm. La distance écran-lentille étant fixée à une valeur légèrement supérieure à $f_1^{'}$, on détermine la profondeur de champ en déplaçant l'objet. En déduire la distance moyenne objet-lentille. On remplace la lentille précédente par une lentille convergente de distance focale $f_2^{'}$ = 10 cm. Pour la distance objet-lentille déduite précédemment, on déplace l'écran pour obtenir une image nette. La distance lentille-écran étant alors fixée, déterminer à nouveau la profondeur de champ. Conclusion.

Etude n°4 :
L'appareil photographique réflex

I. Objectifs



Durant cette séance nous n'allons pas vous apprendre à faire de belles photographies. Ce type d'appréciations fait appel à des notions subjectives, artistiques, propres à la sensibilité de chacun. Certains peuvent critiquer la photographie ci-contre qui est faite à contre-jour, d'autres non…

Nous considérerons donc l'appareil photographique d'un point de vue purement technologique, en bon scientifique. Votre objectif consiste à savoir utiliser un appareil reflex avec ses différents réglages et à comprendre l'incidence de ces réglages sur les prises de vue. Le principe de fonctionnement de l'appareil photographique sera étudié expérimentalement en effectuant différentes photographies et expliqué par des modélisations théoriques simples. On entend par « simple » le fait que toutes les études théoriques seront effectuées en modélisant l'objectif par une lentille mince convergente alors que certains objectifs d'appareil photo peuvent comporter plusieurs dizaines de lentilles. Les études seront menées avec un appareil reflex numérique.

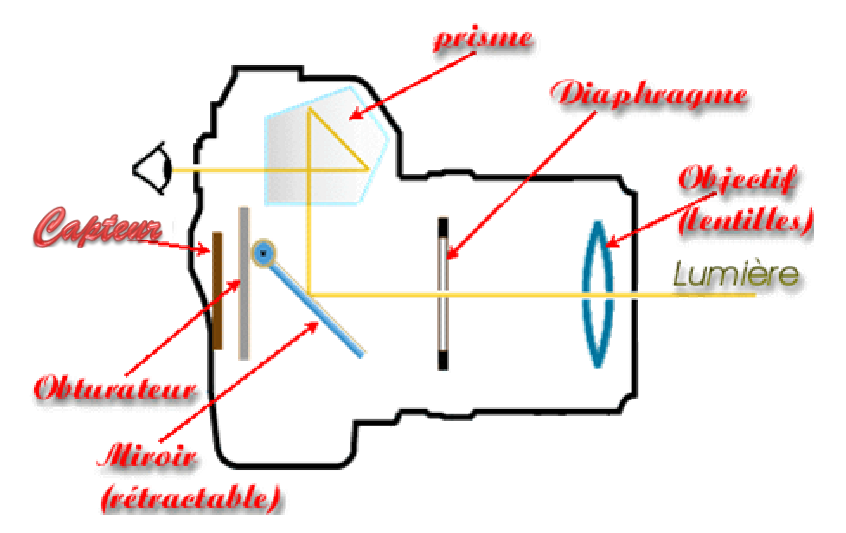
II. Notions de photographie

Dans ce paragraphe, nous introduisons succinctement les grandeurs et paramètres qui seront étudiés par la suite. Vous pourrez trouver plus de détails dans le manuel d'utilisateur du D3000 de Nikon disponible durant la séance, ainsi que sur le site de l'UE ou sur de nombreux sites internet. Certains paragraphes qui suivent sont d'ailleurs largement inspirés de certains de ces sites, comme :
http://dp.mariottini.free.fr/Dossier/photo-numerique/conseils-utiliser-appareil-numerique.htm

II.1.1. Description générale d'un appareil photographique réflex

Objectif : système de lentilles permettant la formation d'image sur le plan du film.

Diaphragme : système mécanique qui permet de contrôler la quantité de lumière qui pénètre dans l'appareil et qui arrive sur la pellicule (film).



Miroir + pentaprisme : Système de visée qui permet de voir la même image que celle impressionnée (enregistrée) sur le film.

Obturateur : Système qui permet de contrôler le temps d'exposition du film.

Chambre noire : boîte étanche à la lumière contenant le capteur, assimilable à un écran fixe où vient se former l'image.

II.2. L'objectif

II.2.1. Focale

Dans le jargon photographique on ne parle pas de distance focale mais de « focale ». Un objectif est constitué de plusieurs lentilles : pour les objectifs les plus simples, ayant une focale fixe, il y a généralement entre 4 et 8 lentilles ! La focale qui est donnée représente donc la distance focale du système optique équivalent.

II.2.2. Ouverture et nombre d'ouverture

- On appelle « ouverture » d'un appareil photographique le diamètre D de la pupille d'entrée de l'objectif. Lorsqu'on considère l'éclairement du détecteur, intervient le rapport de la focale sur le diamètre de l'ouverture : $N=f/D$. Ce rapport N, appelé « nombre d'ouverture », est une grandeur sans unité.

- **Attention à ne pas confondre « l'ouverture » et le « nombre d'ouverture »** : plus le nombre d'ouverture est grand et moins le diaphragme est ouvert ! Par exemple avec l'appareil utilisé en séance, quand on lit « aperture F11 », cela signifie que le nombre d'ouverture est égal à 11 et que l'ouverture est D = f/11. On trouve aussi dans la documentation technique la notation f/# pour désigner le nombre d'ouverture.

- L'ouverture joue un rôle fondamental sur la profondeur de champ, introduite plus bas.

II.2.3. Zoom

Un objectif à focale variable est appelé « zoom ». Il est fort difficile de construire un zoom performant à toutes les focales. En particulier, pour les objectifs courants, les ouvertures sont faibles (et donc le temps de pose a tendance à être élevé) et de ce fait, le risque de flou dû au bougé est plus important. Les photographes confirmés préféreront utiliser plusieurs objectifs à focale fixe ou plusieurs zooms différents, de meilleures qualités qu'un zoom unique ayant une grande plage de variation de la distance focale.

II.3. Temps de pose

L'acquisition d'une image se fait en exposant le capteur pendant un temps déterminé, appelé « temps de pose ». Le temps de pose est indissociable de l'ouverture utilisée. Plus l'ouverture est grande, plus le temps de pose doit être court et inversement.

II.4. Sensibilité (ISO)

Pour avoir une photographie bien exposée, il est important d'avoir la quantité de lumière nécessaire : trop de lumière et la photo sera surexposée (trop claire), pas assez et elle sera sous-exposée (trop foncée). L'exposition dépend de la sensibilité (exprimée en ISO) : plus celle-ci est élevée, plus le capteur est sensible à la lumière. Si on choisit une valeur ISO élevée, on pourra opter pour une ouverture plus faible et/ou un temps de pose plus court.

En passant de 100 à 800 ISO avec un appareil numérique, on ne modifie pas la sensibilité réelle du capteur (contrairement au cas des pellicules de différentes ISO pour les appareils argentiques). On introduit seulement une modification de l'amplification du signal électrique délivré par les sites photosensibles du capteur. La sensibilité « naturelle » du capteur numérique se trouve vers 200 ISO : passer à des sensibilités supérieures permet d'éviter le flou dû au bougé (en autorisant un temps de pose plus court), mais la qualité des images se dégrade avec l'augmentation de la sensibilité, entraînant des bruit de fond ou des effets de neige. On retrouve le grain « poussé » des pellicules argentiques, aussi il est conseillé de ne

pas trop pousser la sensibilité du réglage. Il faut parfois choisir entre une photo nette et granuleuse ou fine mais floue !

II.5. Capteur CCD

Le capteur de l'appareil utilisé en TP est un capteur CCD (Charge Coupled Device, ou dispositif à transfert de charges) qui constitue la zone photosensible. Il remplace la pellicule des anciens appareils argentiques. Il s'agit d'une matrice de pixels, chaque pixel étant un photodétecteur individuel. Le capteur est caractérisé par son nombre de pixels mais également par la dimension de chaque pixel (ou la dimension totale du capteur). Ce dernier paramètre est rarement mis en avant mais il est fondamental pour la notion de netteté d'image reliée à la profondeur de champ.

II.6. Profondeur de champ

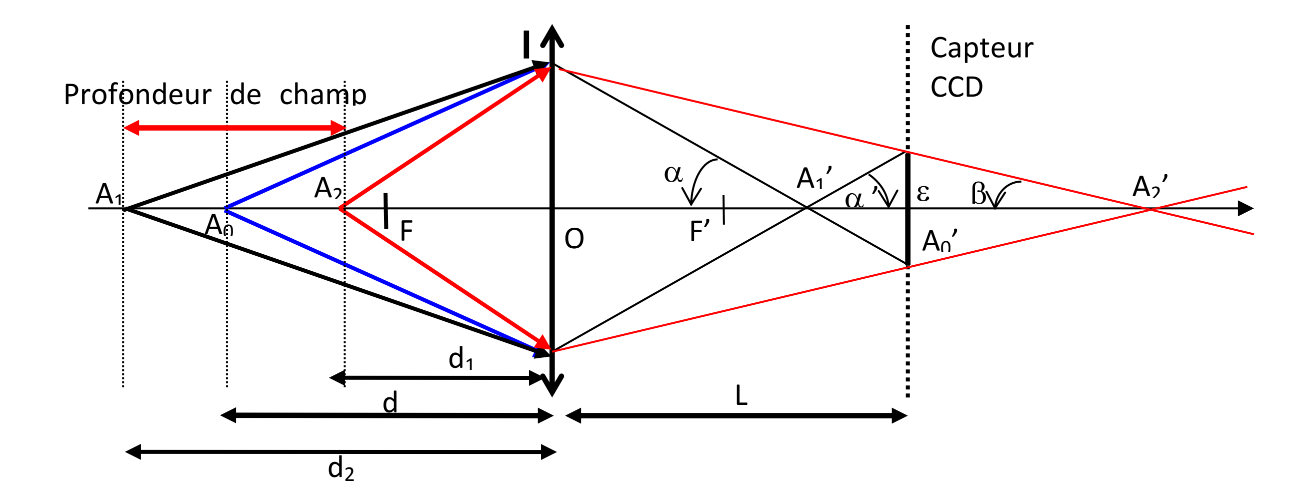
Comme pour tout système optique, la profondeur de champ (ou plage de netteté) est définie par la différence entre les positions minimale et maximale de l'objet qui donne une image nette. Avec un appareil reflex il est très facile de modifier arbitrairement la profondeur de champ ce qui constitue une différence majeure par rapport aux appareils automatiques. Une image est considérée comme nette lorsqu'un point objet donne un seul point image, sachant que, dans le cas de la photographie numérique, un point image est en fait un pixel du CCD.

III. Etude préparatoire

Exercice : latitude de mise au point et profondeur de champ

La mise au point d'un appareil photographique s'effectue en déplaçant l'objectif par rapport au capteur, jusqu'à obtenir une image nette. Cependant, l'exigence de netteté de la photographie va dépendre de la dimension ε du pixel de la caméra CCD : l'image d'un point objet dans le plan du capteur est en effet un spot de taille finie plus ou moins grande suivant la qualité de l'optique et de la mise au point, mais il suffira en pratique que la taille du spot soit plus petite que ε pour que la netteté de la photo soit optimale. On peut donc avoir une image avec la même apparence de netteté pour plusieurs distances objet-objectif. Cette plage de distance définit la profondeur de champ.

La profondeur de champ est l'un des critères les plus importants d'une photographie et peut être facilement modifiée grâce aux différents réglages accessibles pour un appareil photo réflex. Nous allons, au cours de cet exercice, nous familiariser avec les différentes grandeurs qui influent sur la profondeur de champ d'un appareil photo.



On suppose que l'appareil et le sujet sont fixes pour qu'il n'y ait pas d'effet de flou dû au bougé, qui donnerait bien évidemment un flou indépendant de la profondeur de champ. L'objectif est de déterminer la relation entre la profondeur de champ, la focale, l'ouverture et la dimension des pixels. L'étude est effectuée pour une mise au point donnée, c'est-à-dire pour une distance fixe entre l'objectif et le capteur.

1. *Relation entre profondeur de champ et dimension d'un pixel pour une ouverture donnée.*

a. Modélisation de l'appareil photographique : représenter l'objectif par une lentille convergente de 3 cm de focale. Choisir une ouverture de 6 cm. Représenter le plan du capteur CCD à 5 cm de la lentille et modéliser le pixel au centre de l'axe optique. On choisira une dimension du pixel ε = 1 cm. Expliquer pourquoi on a choisi une distance focale inférieure à la distance entre la lentille et le CCD.

b. Montrer qu'on peut avoir l'impression d'une image nette pour différentes positions de l'objet. Pour cela, à l'aide d'un tracé de rayons, déterminer la position de l'objet la plus éloignée, A_1, et la position la plus proche, A_2, qui donnent une image nette. Indiquer sur le schéma l'écart, entre ces deux positions, qui définit la profondeur de champ.

c. Est-ce que la relation de conjugaison est rigoureusement vérifiée pour l'ensemble des points objets qui se trouvent dans la plage définie par la profondeur de champ ?

2. *Relation entre profondeur de champ et ouverture numérique.*

Montrez qualitativement que l'on peut jouer sur la profondeur de champ en modifiant l'ouverture du diaphragme (par exemple, refaire un schéma avec une ouverture différente du précédent).

3. *Expression de la profondeur de champ*

Pour une distance d de mise au point, on peut montrer que les positions des points A_1 et A_2 sont approximativement données par :

$$d_1 = \frac{d \times f^2}{f^2 + d\varepsilon N} \quad \text{et} \quad d_2 = \frac{d \times f^2}{f^2 - d\varepsilon N}$$

a. En supposant que la dimension, ε, d'un pixel de l'appareil D3000 est de 6 µm, remplir les tableaux suivants de profondeur de champ pour les focales de 18 et 55 mm, des nombres d'ouverture de 2,8 et de 22 et des distances de mise au point de ∞, 10, 5 et 2 m (interpréter les éventuelles valeurs négatives que vous pourriez obtenir…).

f'(mm)	18				55			
N	2,8				2,8			
d	2	5	10	∞	2	5	10	∞
d_1(m)	1,82							
d_2(m)	2,24							
P_{champ}(m)	0,42							

f'(mm)	18				55			
N	22				22			
d	2	5	10	∞	2	5	10	∞
d_1								
d_2								
P_{champ}(m)								

b. Pour chacune des deux tables de profondeur de champ ci-dessus, déterminer un ensemble de conditions possibles de travail lorsque l'on veut avoir nets, sur un même cliché, les images de deux objets séparés par une distance de 5 m et dont le plus proche est à 3 m de l'objectif. On supposera que les deux objets se trouvent sur l'axe optique de l'appareil.

4. Etude de l'effet de l'ouverture sur la profondeur de champ

a. Pour faire ressortir un sujet sur une photographie comme dans le cas d'un portrait ou d'une macro, faut-il augmenter ou diminuer la profondeur de champ ? Par conséquent, faut-il augmenter ou diminuer l'ouverture ?

b. On souhaite réaliser une photo où deux objets situés à 40 et 50 cm du photographe doivent être nets. Montrer qu'il n'est pas possible de réaliser cette photographie avec une focale de 55 mm et un nombre d'ouverture de 8.

c. Sans modifier la distance des deux objets par rapport à l'appareil, quelle-est la plus grande profondeur de champ qui puisse être obtenue ? Est-il possible de réaliser une photo nette des deux objets de la question précédente?

IV. Partie Pratique

IV.1. Compte-rendu

Le compte-rendu sera rédigé et tapé sur ordinateur. La version imprimée sera donnée à l'enseignant, avec les photos (de petite taille) numérotées et incluses dans le rapport. Les fichiers originaux de ces photos, numérotés conformément au CR, seront transmis à l'enseignant sur une clé USB. Penser, pour chaque photo de votre compte rendu, à bien préciser les choix des paramètres importants de votre étude (temps de pose, focale, ouverture…)

IV.2. Matériel

Vous avez à votre disposition un boitier d'appareil photographique numérique D3000 de chez Nikon équipé d'un objectif à focale variable (« zoom ») « 18-55mm f/3.5-5.6 ». Vous êtes responsable pendant toute la durée de la séance du bon état de l'appareil et de tous les éléments associés :

- *Un manuel d'utilisateur,*
- *Une carte mémoire,*
- *Une batterie,*
- *Un cache objectif,*
- *Un câble de connexion USB.*

IV.2.1. Précautions d'usage

Afin d'éviter tout risque de chute et de détérioration du matériel, nous vous demandons de toujours utiliser la bandoulière lors des prises de vue et de remettre le cache objectif après chaque utilisation.

IV.2.2. Spécifications

La fiche technique est à votre disposition en séance, nous avons reproduit ici les premières lignes :

Type	Reflex numérique
Monture d'objectif	Monture Nikon F (avec contacts AF)
Champ angulaire effectif	Environ 1,5x la focale de l'objectif utilisé (format DX Nikon)
Pixels effectifs	10,2 millions
Capteur d'image	Capteur DTC 23,6 x 15,8 mm
Nombre total de pixels	10,75 millions
Système anti-poussière	Nettoyage du capteur d'image, système de contrôle du flux d'air, données de référence pour correction poussière (logiciel Capture NX 2 optionnel requis)
Taille d'image (pixels)	3872 x 2592 [L], 2896 x 1944 [M], 1936 x 1296 [S]
Format de fichier	▪ NEF (RAW) ▪ JPEG : conforme au format JPEG Baseline avec un taux de compression Fine (environ 1:4), Normal (environ 1:8) ou Basic (environ 1:16) ▪ NEF (RAW) + JPEG : enregistrement des photos aux deux formats, NEF (RAW) et JPEG

IV.2.3. Prise en main ultra rapide

Cet appareil a été choisi pour son « utilisation facile, intuitive et sans souci » (communiqué de presse Nikon, déc. 2006). N'hésitez donc pas à naviguer dans les différents menus et si le bon sens n'est pas suffisant pour trouver le réglage recherché, il vous suffira de vous reporter au manuel d'utilisateur (voir le site de l'UE).

Ecran de contrôle (LCD) :

Vous pouvez faire apparaître :

❖ Le « menu » pour accéder aux très nombreux réglages.

- ❖ Les prises de vue enregistrées en choisissant d'afficher ou non les différents réglages utilisés (sélecteur multidirectionnel).
- ❖ Les informations sur les réglages en cours (bouton « info » à côté du déclencheur). Une partie de ces informations sont en permanence inscrites dans le viseur.

Modes de prise de vue :

Le D3000 offre la possibilité de choisir parmi 12 modes de prises de vue grâce au sélecteur de mode situé sur le dessus du boitier. Les modes qui seront utilisés sont les 5 modes suivant : (tout) Automatique et surtout P, S, A et M qui permettent de contrôler une série de réglages avancés. Il existe en outre des modes scènes, que nous n'utiliserons pas, avec différents réglages adaptés à des situations particulières (portrait, paysages, enfants, image de nuit, …).

Les modes P, S, A et M offrent des niveaux de contrôle différents sur la vitesse d'obturation (ou le temps de pose) et l'ouverture :

- ❖ **Mode P (« auto programmé »)** : la vitesse d'obturation et l'ouverture sont déterminés automatiquement par l'appareil, les autres paramètres étant choisis par l'utilisateur (très proche du mode Automatique).
- ❖ **Mode S (« priorité à la vitesse »)** : l'utilisateur choisit la vitesse et l'appareil détermine l'ouverture pour des résultats optimaux.
- ❖ **Mode A (« priorité à l'ouverture »)** : l'utilisateur choisit l'ouverture et l'appareil détermine la vitesse pour des résultats optimaux.
- ❖ **Mode M (« manuel »)** : l'utilisateur contrôle la vitesse et l'ouverture. Le temps de pose est contrôlée par la molette et l'ouverture avec cette même molette mais il faut appuyer sur le bouton ± situé à côté du bouton On/Off.

IV.3. Configuration de l'appareil

- ❖ Avant toute prise de vue, vérifier le mode de prise de vue.
- ❖ Vérifier que la carte mémoire n'est pas pleine.
- ❖ Configurer l'appareil pour utiliser la plus **grande taille d'image** disponible [« JPEG Fine »] (3872x2592 pixels).
- ❖ Mettre l'objectif en **autofocus** (sélecteur sur l'objectif en position A) pour que la mise au point soit effectuée automatiquement.

IV.4. Temps de pose et nombre d'ouverture

- ❖ Choisir un sujet à environ 2 m avec un fond lointain (votre binôme sur fond de campus, par exemple). Travailler avec une focale de l'ordre de 35 mm.

- ❖ Se mettre **en mode A (priorité ouverture)**. Régler le nombre d'ouverture sur 8 ou 11. Noter le temps de pose indiqué et prendre la photo.

- ❖ Avec le nombre d'ouverture retenu, choisir en **mode manuel M** un temps de pose qui permette de prendre une photo surexposée puis sous-exposée.

- ❖ **Revenir au mode A** et prendre rapidement (pour que la luminosité soit stable) plusieurs photos du même sujet en changeant le nombre d'ouverture et en notant à chaque fois le temps de pose correspondant (ne changer aucun autre paramètre de l'appareil photo et ne pas modifier le cadrage). Représenter les résultats sous la forme d'une courbe adaptée reliant nombre d'ouverture et temps de pose. Quelle relation mathématique attend-on entre le temps de pose et le nombre d'ouverture lorsque l'exposition est constante (ce qui est assuré par le mode A) ? Comment se comporte le mode A par rapport à la relation attendue ?

- ❖ Expliquer pourquoi, même pour une scène statique, le temps de pose a une influence sur la netteté globale de l'image.

IV.4.1. Relation entre temps de pose et distance focale : « Règle des photographes »

Pour une scène où il n'y a pas de mouvement, il existe une règle, communément admise chez les photographes :

« Pour réaliser une photo à main levée sans risque de flou, le temps de pose doit être inférieur ou égal à l'inverse de la focale. »

Attention, pour un reflex numérique il faut multiplier la focale de l'objectif par 1,5 pour appliquer cette règle. Pour une focale de 50 mm par exemple, le temps de pause devra être plus court que 1/75 s et non 1/50 s. Ce facteur de 1,5 est lié à la différence de taille de capteur CCD par rapport à un appareil argentique.

❖ Pour deux distances focales différentes, étudier cette règle. Préciser l'étude effectuée et discuter de la validité de cette règle.

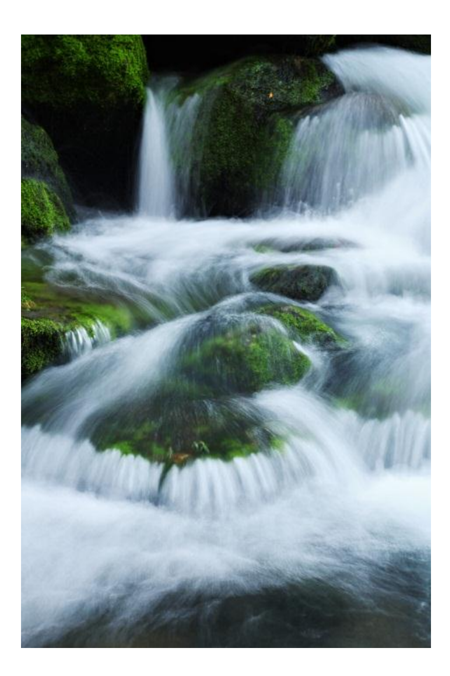
IV.4.2. Comment régler le temps de pose lorsque le sujet est en mouvement ?

- ❖ Pourquoi faut-il diminuer le temps de pose lorsqu'on veut photographier un sujet en mouvement ? Pourquoi peut-il être gênant de trop le diminuer ?

- ❖ Expliquer pourquoi le temps de pose maximal permettant d'avoir une image nette est relié à la dimension d'un pixel.

- ❖ Mettre en évidence le mouvement de votre binôme en train de courir, jongler ou encore le mouvement du tramway, en prenant des photographies avec différents temps de pause. On travaillera **en mode manuel M**. Vous indiquerez pour chaque photographie, la focale le nombre d'ouverture choisi et bien évidemment le temps de pause choisi. Conclure.

IV.5. Sensibilité (ISO)



- ❖ Se mettre en mode A avec une ouverture maximale.
- ❖ Vérifier que la fonction « réduction du bruit » n'est pas activée.
- ❖ Etudier expérimentalement la relation entre sensibilité et temps de pose, en prenant plusieurs photos bien exposées.
- ❖ Tracer le graphe ISO en fonction de l'inverse du temps de pose et conclure.
- ❖ Pourquoi faut-il utiliser un pied quand on travaille à faible ISO ?
- ❖ Pour prendre en photo un ruisseau en recherchant un effet « filé » (cf. photo ci-contre), comment faut-il régler la sensibilité ?

IV.6. Etude de l'effet de l'ouverture sur la profondeur de champ

- ❖ Pour faire ressortir un sujet sur une photographie comme dans le cas d'un portrait ou d'une macro, faut-il augmenter ou diminuer la profondeur de champ ? Donc faut-il augmenter ou diminuer l'ouverture ?
- ❖ On souhaite réaliser une photo de deux objets situés à 40 cm et 50 cm du photographe. Montrer qu'avec une focale de 55 mm et un nombre d'ouverture N=8,

il n’est pas possible de réaliser une photo nette. Réaliser l’expérience et comparer à la théorie (cf. la partie préparatoire). Quelle précaution(s) particulière(s) faut-il prendre ?

- Est-il possible de réaliser la photo des deux objets de la question précédente (sans modifier la position de l’appareil par rapport aux objets, ni le cadrage, ni la focale) ? Réaliser l’expérience et comparer à la théorie.

IV.7. Influence de la focale sur l’angle de champ (ou champ angulaire) et la profondeur de champ

- Choisir une vue avec un sujet situé à 1 m, comprenant d’autres plans entre 1 m et l'infini. Se mettre en mode automatique et faire la mise au point sur le sujet placé à 1 m.
- En changeant uniquement la focale de l’appareil photo, prendre quelques photos. Mesurer dans chaque cas l’angle de champ. Comment évolue-t-il avec la distance focale ?
- Etudier la profondeur de champ : calculer la distance de netteté devant et derrière le sujet.

V. Questions de synthèse

- L’appareil photographique le plus performant sera forcément celui qui possède le plus de pixels. Vrai ou Faux ?
- Les objectifs qui ont un nombre d’ouverture les plus petits sont généralement les moins chers. Vrai ou Faux ?
- Pour faire des portraits avec une petite profondeur de champ, faut-il utiliser un nombre d’ouverture petit ou élevé ?
- Avec le même appareil photo, pour une focale donnée, la profondeur de champs est plus faible pour une mise au pont à 50 cm qu’à l’infini. Vrai ou Faux ?
- Dans des conditions de luminosité standard, avec un appareil numérique quel est le temps de pose maximal conseillé pour une focale de 30 mm ?
- Quel est l’intérêt d’augmenter la sensibilité ?
- Les paparazzis utilisent généralement des zooms ayant des petites focales. Vrai ou Faux ?
- On considère deux photographies prises en mode priorité à l’ouverture. Pour la première on a $N_1 = 4$ et pour la seconde, $N_2 = 16$. Donner la relation entre les temps de pose de ces deux photographies.

Etude n°5 :
Initiation au traitement numérique d'images

Même remarque que pour le TP n°4, en ce qui concerne le compte-rendu rédigé et tapé sur ordinateur (version imprimée donnée à l'enseignant, avec les images numérotées et incluses dans le rapport ; les fichiers - images, numérotés conformément au CR, seront transmis à l'enseignant sur une clé USB)

I. Introduction et objectifs

L'image numérique a maintenant envahi notre quotidien. On va s'attarder ici à définir ce qu'est une image numérique. Pendant cette séance, nous verrons d'abord ce qu'est une image dans sa version la plus simple. Nous verrons les grands concepts, comme son format, le nombre de pixels, ce qu'est une couleur etc. Nous verrons ensuite quelques outils pour manipuler ces concepts à partir d'images tests. Nous finirons par essayer de comprendre comment fonctionne les améliorations automatiques d'image. Pour faire ce TP, nous utiliserons le logiciel Gimp, un logiciel libre de retouche d'images (GNU Image Manipulation Programme).

Nous vous conseillons fortement, avant le TP, de télécharger ce logiciel sur votre ordinateur personnel, de façon à vous familiariser avec son utilisation et notamment à comprendre les opérations de transformation des niveaux des pixels : http://www.gimp.org/

A l'issue de ce TP, vous saurez effectuer les tâches suivantes :

- redimensionner et convertir des images
- effectuer des traitements des images (correction des couleurs, modification du contraste...)
- appliquer des effets divers.

Par ailleurs, les compétences acquises ne se limitent pas l'utilisation de Gimp, en effet, vous ne serez pas dépaysés avec d'autres logiciels de retouche d'images (comme ImageJ) pour lesquels les concepts évoqués dans ce TP sont identiques.

II. Exercice préparatoire

Une partie importante des méthodes de traitement d'images consistent à modifier les valeurs (aussi appelées niveaux ou intensités) des pixels, indépendamment de leurs positions dans l'image : c'est le cas du seuillage par exemple, où on met à 0 tous les pixels de niveau inférieur à un certain seuil. De façon plus générale, on peut appliquer des transformations linéaires, du type I' = a×I + b sachant que les niveaux I et I' sont toujours compris entre 0 et 255, ce qui revient à modifier le contraste et la luminosité.

De façon générale, toute changement des niveaux des pixels modifie, *a priori*, l'histogramme (c'est-à-dire la distribution) des niveaux des pixels de l'image. Il existe un traitement particulier, appelé égalisation d'histogramme, qui consiste à transformer les niveaux de sorte que l'histogramme, qui initialement ne remplit pas uniformément toute la plage 0 – 255, la remplisse uniformément après égalisation.

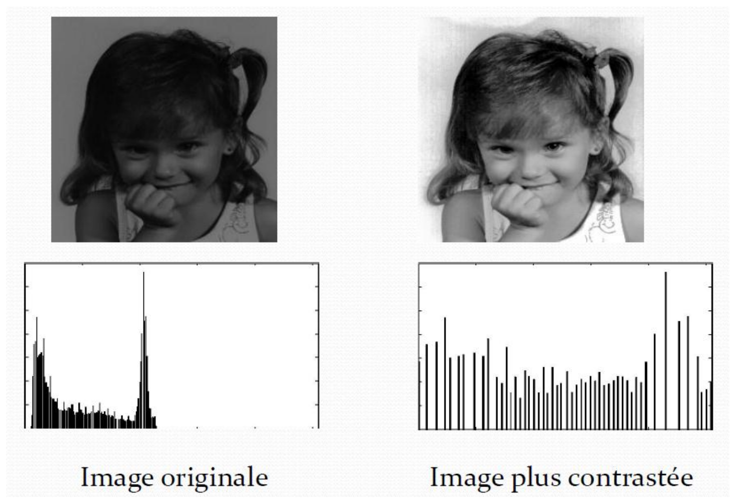


Figure 1: principe de l'égalisation (d'après http://dept-info.labri.fr/~vialard/Traitement/cours/cours2.pdf)

En assimilant un histogramme à une fonction continue, cela revient à effectuer la transformation suivante :

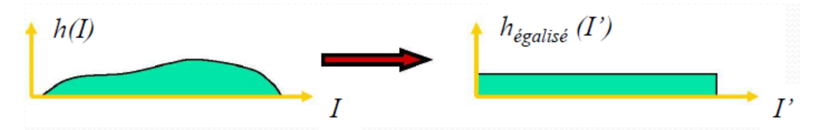


Figure 2: égalisation, dans le cas d'un histogramme continu

h(I)dI est ici la probabilité de trouver un pixel de niveau compris entre I et I + dI, avant égalisation ; après égalisation la probabilité $h_{\text{égalisé}}(I')$ est devenue la même quel que soit le niveau I' du pixel, c'est-à-dire que l'image contient le même nombre de pixels de niveaux entre 0 et 10, entre 10 et 20, etc. $h_{\text{égalisé}}(I')$, est donc une constante. Les deux distributions sont reliées par une relation générale qui traduit la conservation du nombre de pixels :

$$h(I)dI = h_{\text{égalisé}}(I')dI'$$

1) Montrer que si les nouvelles valeurs I' des pixels sont reliées aux anciennes par la relation :

$$I' = \int_0^{I'} h(I)dI$$

alors la nouvelle distribution est bien plate.

2) La relation entre I' et I peut-elle être linéaire ? Considérez par exemple le cas d'un histogramme initial qui soit uniforme dans un certain sous intervalle $I_1 - I_2$ et nul à l'extérieur (entre 0 et I_1 et entre I_2 et 255).

3) En déduire pourquoi la courbe de transformation des niveaux des pixels, permettant l'égalisation de l'histogramme ci-dessous, est la courbe superposée tracée en noir. Donnez quelques autres exemples, de votre cru, de courbes de transformation correspondant à une égalisation.

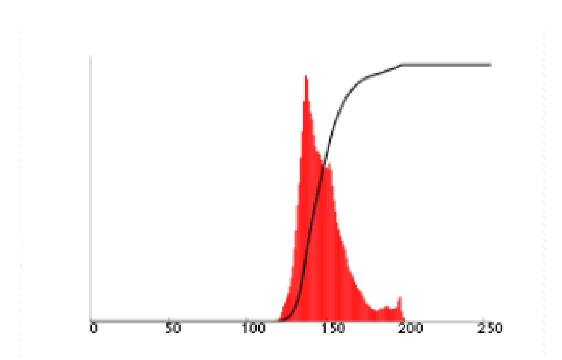


Figure 3: transformation des niveaux lors de l'égalisation (d'après http://dept-info.labri.fr/~vialard/Traitement/cours/cours2.pdf)

III. Format d'images en échelle de gris

Au démarrage de Gimp, apparaissent plusieurs fenêtres. La fenêtre contient les outils de bases ainsi que les menus de l'application. On trouve dans « **Fichier** », les commandes habituelles d'ouverture, enregistrement, impression... et le contrôle de l'affichage des autres fenêtres : sous-menu « **Fenêtres** ».

- ❖ A chaque fois on peut annuler l'opération précédente en allant dans « Edition>Annuler… »
- ❖ Pour pouvoir toujours revenir à l'image originale faire « Image>Dupliquer » avant de commencer les opérations, et ne jamais enregistrer une image modifiée sous le nom de l'image originale.

  - ❖ Ouvrir une de vos images jpg avec ce logiciel. Transformer la en noir et blanc (menu « Image>Mode>Niveaux de gris »). Déterminer le nombre de pixels de votre image (cliquer sur « Image>Propriétés de l'image »).

Enregistrer l'image au format « pgm » ascii et au format brut. (« Fichier>Exporter… » et sélectionner le type de fichier). Ouvrir cette même image « pgm » en ascii avec un logiciel de texte : notepad++ ou Wordpad. Expliquer le nombre de lignes du fichier. Expliquer pourquoi les chiffres sont compris entre 0 et 255. En déduire en gros la taille des fichiers « pgm » ascii et brut et comparer ces valeurs avec les valeurs indiquées par l'ordinateur.

- Editer un fichier ascii décrivant un rectangle de 4x3 pixels comportant une ligne de blanc suivi d'une ligne de gris et d'une ligne de noir : Créer ce fichier et l'enregistrer avec l'extension « .pgm » et l'observer sous GIMP (utiliser « Outils>Zoom » pour qu'il apparaisse à l'écran avec une taille raisonnable).
- Ouvrir à nouveau une de vos images jpg avec Gimp, puis l'enregistrer au format JPEG avec différents niveaux de qualité. Comparer les tailles des fichiers et la qualité des images obtenues (Pour cela agrandir, autant que nécessaire, l'image au moyen de la commande « Affichage>Zoom » ou utiliser l'onglet dans le bas de l'image affichée). Commenter sur l'intérêt du format JPEG et ses défauts.
- En sélectionnant le menu « Image>Echelle et taille de l'image » enregistrer la même image au format JPEG avec des nombres de pixels réduits et le niveau de qualité par défaut (valider vos choix en cliquant sur « Echelle »). Comparer comme à la question précédente la taille des fichiers et la qualité des images obtenues. Vous pouvez comparer la qualité des images ainsi « comprimées » à celle de la question précédente en effectuant les comparaisons à taille d'image identique.

En conclusion, vous désirez réduire la taille de vos fichiers image. Que vaut-il mieux faire : enregistrer avec une qualité réduite ou avec une échelle réduite ?

IV. Quelques outils de caractérisation des images et de transformation des images

- Ouvrir une image jpg noir et blanc et dans le menu Couleurs, choisir :
  - Niveaux. Modifier les seuils d'entrée et de sortie ; à quoi correspondent les chiffres dont vous pouvez modifier les valeurs ? Quelle transformation est appliquée aux pixels ?
  - Inverser. Quelle transformation est appliquée aux pixels dans ce cas ? (vérifier votre hypothèse en regardant le contenu d'un fichier ascii inversé)

- Postériser. Gimp réduit alors le nombre de niveaux de gris. Choisir le « niveau de postérisation » 2 et regarder le nombre de couleurs différentes dans l'image (menu couleur, information, analyse colorimétrique). A partir de quel nombre de niveaux de postérisation l'image vous parait-elle correctement reproduite ? A quel « nombre de couleurs » cela correspond-il ? Regarder l'effet de postérisation sur une image couleur. En déduire l'opération qui est réalisée lorsqu'on enregistre une image jpg avec une qualité réduite.

❖ Ouvrir une image en niveau de gris.
  - Afficher l'histogramme des niveaux de gris (menu « Couleurs>Information>Histogramme »)
  - Modifier la luminosité de l'image (menu « Couleurs>Luminosité et contraste »), observer l'aspect de l'image modifiée et les changements de l'histogramme. Mêmes questions en modifiant le contraste. Interpréter. Quelles sont les opérations faites sur les valeurs des pixels pour la luminosité et le contraste. Pour vous aider à trouver les lois de transformation, regarder comment la moyenne de l'image et les valeurs minimales ou maximales de l'image sont affectées par ces opérations. Vous pouvez également regarder les courbes de transformation associées.
  - Egaliser l'image originale (« Couleurs>Auto>Egaliser »). Observer l'aspect de l'image modifiée et les changements de l'histogramme.

V. Images en couleur

Ouvrir une image en couleur.

- Sélectionner « Couleurs>Informations>Histogramme » et afficher les histogrammes correspondant aux différentes couleurs rouge, vert, bleu.
- Dupliquer l'image originale. Sélectionner « Couleurs>Inverser » et observer l'aspect de l'image, les histogrammes correspondant aux différentes couleurs de l'image transformée et les comparer à ceux de l'image originale
- Revenir à l'image originale. La dupliquer. Sélectionner « Couleurs>Auto>Balance des blancs » et observer l'aspect de l'image, ainsi que les histogrammes correspondant aux différentes couleurs de l'image transformée et les comparer à ceux de l'image originale.
- Revenir à l'image originale. Sélectionner «Fenêtre> Fenêtres ancrables >canaux». Afficher les différents canaux. A quoi correspondent-ils ? Observer le résultat obtenu lorsqu'on superpose 2 de ces canaux.

Etude n°6 : Eclairage et photographie en couleurs

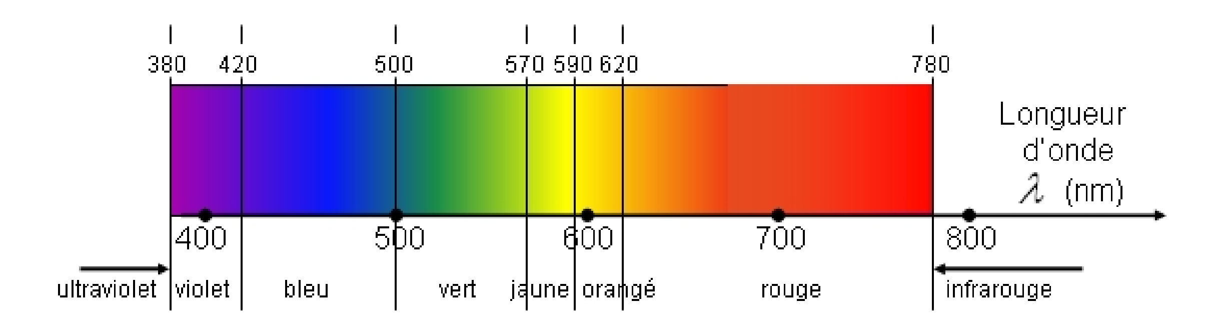
Attention : demander à l'enseignant d'éteindre les tubes fluorescents lors de la réalisation de vos photos.

Même remarque que pour le TP n°5, en ce qui concerne le compte-rendu rédigé et tapé sur ordinateur (version imprimée donnée à l'enseignant, avec les images numérotées et incluses dans le rapport) et les fichiers – images transmis séparément. Les courbes et graphiques seront, soit retracés avec un logiciel (tel que SciDaVis sur les ordinateurs de la plate-forme), ou bien obtenus par copie d'écran à partir de SpectraSuite et GIMP.

I. Introduction

La plupart des photos réalisées de nos jours sont des photos en couleurs. Cela pose la question de ce qu'est la couleur, comment on la définit, comment on la mesure, comment on l'enregistre, comment on la reproduit (que ce soit sur un document imprimé, une diapositive projetée ou un document électronique visionné sur un écran), comment on la perçoit.

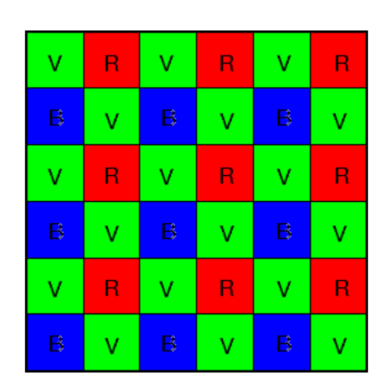
Au niveau physique la couleur est reliée au spectre S(λ) du rayonnement optique qui parvient au détecteur. Les « couleurs de l'arc en ciel » correspondent aux rayonnements monochromatiques de longueur d'onde « visibles » comprises en gros entre 400 et 750nm, suivant la répartition (limites un peu arbitraires) :

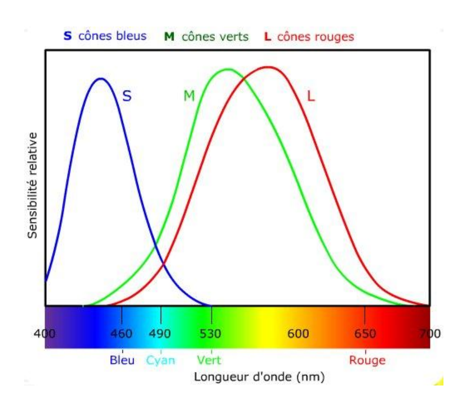


Au niveau physiologique, le détecteur est l'œil et la sensation de couleur résulte de la présence sur la rétine de 3 types de cellules, appelées cônes ayant des sensibilités différentes suivant la « couleur » du rayonnement qui les éclaire : les cônes « bleus » sont

sensibles au rayonnement dans la gamme 400-540nm, les « verts » sont sensibles dans la gamme 480-600nm, les rouges sont sensibles dans la gamme 550-750nm.

De façon analogue, un appareil photo couleur comprend une matrice de photodétecteurs devant laquelle est placée une mosaïque de microfiltres colorés (« filtre de Bayer ») tendant à reproduire la sensibilité des 3 types de cônes.





Un rayonnement sera perçu comme « blanc » si les 3 types de cellules sont excitées avec des intensités comparables, ce qui se produit si le spectre du rayonnement est composé de longueurs d'ondes réparties suivant les 3 intervalles mentionnés ; cela implique que des rayonnements de spectres différents peuvent être perçus comme également blancs (procédé très largement utilisé dans les sources d'éclairage), ou comme ayant la même couleur (procédé justement utilisé dans la reproduction des couleurs en photographie qui nous intéresse aujourd'hui). Cependant, en photographie, le plus souvent ce n'est pas une source de lumière que l'on photographie, ce sont les objets éclairés par une source. Ces objets rediffusent une partie de la lumière qu'ils reçoivent. Lorsqu'on les éclaire avec une lumière « blanche » ces objets nous apparaissent colorés si certaines composantes du spectre de la lumière incidente sont absorbées par l'objet et manquent dans le spectre de la lumière diffusée qui parvient à notre œil. On va caractériser la couleur d'un corps par sa réflectance spectrale $R(\lambda)$, qui est le rapport entre la puissance $P_{diff}(\lambda)$ de la lumière diffusée et la puissance $P_{inc}(\lambda)$ du rayonnement monochromatique reçu à la longueur d'onde λ :

$$R(\lambda) = P_{diff}(\lambda) / P_{inc}(\lambda)$$

La couleur perçue est donnée par le spectre de lumière reçue par l'œil, dont l'intensité est proportionnelle à $P_{diff}(\lambda)$, soit au produit $R(\lambda) \times P_{inc}(\lambda)$. Cette relation montre ainsi que la couleur perçue d'un corps, ou enregistrée par la photo, est fonction à la fois du corps et du spectre $P_{inc}(\lambda)$ de l'éclairage. En fait du point de vue neurologique les choses sont plus compliquées car les neurones analysent « l'image couleur » fournie par les cônes de la rétine de telle sorte que la couleur ressentie d'un ensemble d'objets composant une scène observée est souvent relativement indépendante de la « couleur » de l'éclairage. Ces

phénomènes complexes ont comme contrepartie l'existence de défauts de perception de couleur, que les peintres impressionnistes ont en particulier cherché à représenter (*cf*. la couleur des ombres…).

De la même façon que l'enregistrement ou la perception des couleurs est basée sur l'analyse de la lumière suivant 3 composantes, la restitution des couleurs est souvent réalisée au moyen de la composition de 3 « teintes de base » dont on ajuste directement la répartition et l'intensité ou qu'on atténue plus ou moins en ajoutant du noir (cas de l'impression sur papier, on parle alors de « quadrichromie »). Cependant, il faut bien réaliser que la reproduction de la couleur d'une scène enregistrée au moyen de ce système à 3 teintes de base n'est en pratique pas parfaite car, à cause des recouvrements entre les sensibilités spectrales des cônes de la rétine, elle ne permet pas de synthétiser toutes les combinaisons possibles des niveaux d'excitation de ces 3 types de cônes : les intensités des 3 teintes permettant de restituer la couleur enregistrée au départ sous la forme de 3 nombres I1, I2 et I3 sont solutions d'un système de 3 équations à 3 inconnues, mais ces solutions ne sont physiquement admissibles que si elle sont toutes positives, ce qui n'est pas toujours le cas.

Ce TP va vous permettre de vous familiariser avec ces notions, de déterminer la sensibilité spectrale des pixels de l'appareil photo et de comparer pratiquement et théoriquement les photos d'objets colorés réalisés avec différents types d'éclairages.

II. Documentation

Références bibliographiques

PEREZ : Optique géométrique et ondulatoire, chapitre XX.

FEYNMAN : Mécanique tome 2

Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Couleur

Site web du « CERIG » rattaché à l'Ecole « PAGORA » (école d'ingénieurs internationale du papier, de la communication imprimée et des biomatériaux) de Grenoble-INP, et en particulier le dossier sur la gestion de la couleur : http://cerig.efpg.inpg.fr/ICG/Dossiers/Gestion_couleur/sommaire.htm

III. Travail préparatoire

1) Rechercher sur internet les spectres d'un corps noir à différentes températures. Commentez ces courbes en prenant des exemples ou applications particuliers (rayonnement d'un corps à 37°C, principe du thermomètre infra-rouge, couleur d'une flamme ou d'un morceau de métal, rayonnement de l'univers…).

2) Compte-tenu de la température apparente du soleil (à trouver), superposer le spectre d'un corps noir à la température du soleil au spectre du soleil tel qu'il nous parvient au niveau du sol (toujours à partir de données internet, que vous aurez vérifiées, ou croisées avec d'autres données). Commentez.

IV. Utilisation du Spectromètre à fibre optique

L'outil de mesure que l'on va utiliser dans le TP est un « spectromètre » interfacé avec un ordinateur. Le logiciel de commande affiche alors le « spectre » du rayonnement capté par une fibre optique, c'est à dire la répartition de son intensité suivant la longueur d'onde. Le principe de fonctionnement est le suivant : un « réseau de diffraction » disperse le rayonnement suivant une direction qui dépend de la longueur d'onde et une barrette de photodétecteurs « photographie » la répartition de cette intensité dispersée, que l'on peut directement relier à l'intensité en fonction de la longueur d'onde.

IV.1. Logiciel « spectrasuite »

Le logiciel « spectrasuite » permet d'observer des spectres d'émission, d'absorption ou de réflectance.

- ❖ Commencer par régler la durée d'intégration en fonction de l'intensité du signal, de façon à utiliser au mieux la dynamique du système sans saturation. On peut choisir également le nombre de spectres sur lequel le logiciel calcule une valeur moyenne (Average) pour diminuer le bruit.
- ❖ Veiller à ce que le signal brut détecté ne dépasse pas environ 4000 coups par enregistrement ; au-delà, on atteint la saturation du capteur, ce qui fausse les mesures.
- ❖ Pour figer un spectre, mettre l'acquisition en Pause. Pour les mesures, on dispose d'un curseur (indication en bas à gauche de l'écran : valeur de λ, n° de pixel et intensité correspondante).
- ❖ Enregistrer les spectres au format ascii en cliquant sur l'icône « disquette » et choisir « Tab Delimited, no Header »

IV.2. Spectre d'émission

C'est le mode par défaut, qui visualise les différentes longueurs d'onde présentes. Noter que la sensibilité de la barrette du photodétecteur dépend -tout comme notre œil- de la longueur d'onde. Les barrettes utilisées sont très peu sensible dans l'infrarouge. **Obtenir un signal très faible pour l'infrarouge ne signifie donc pas que l'infrarouge n'est pas présent dans la source de lumière analysée**. Pour avoir le spectre (à peu près) étalonné en intensité, on doit d'abord utiliser une source dont connaît la répartition en intensité. On utilisera ici une lampe halogène dont la température de fonctionnement est environ de 3100 K. A partir de cette mesure, on peut corriger le spectre mesuré pour obtenir le vrai spectre de la source que l'on étudie. Suivre la démarche suivante pour l'étalonnage en intensité du spectromètre.

- ❖ Enregistrer un spectre d'obscurité (Store Dark Spectrum) obtenu en cachant la lumière venant de la source lumineuse (ce spectre contient la lumière parasite et le signal d'obscurité du photodétecteur). On peut alors retirer ce signal parasite de tout signal enregistré en cliquent sur l'icône Scope Minus Dark.

- ❖ Enregistrer un spectre de référence (Store Reference Spectrum) obtenu en observant le spectre d'une lampe à halogène émettant un spectre du type corps noir correspondant à sa température de fonctionnement (attention à ne pas saturer le détecteur, éloigner suffisamment la fibre de la lampe, choisir un temps d'exposition assez court). Le menu "Processing > Set Color Temperature" affiche la température par défaut de la lampe (typiquement 3100K pour le filament d'une lampe halogène courante).

- ❖ On passe ensuite en mode "Relative Irradiance" ("Relative" au sens où l'intensité a été calibrée)

    - On peut alors observer le spectre calibré de n'importe quelle source lumineuse : observer celui des tubes fluos de la pièce, de la lumière du jour par la fenêtre, celui de la lampe à halogène lorsqu'on baisse son courant d'alimentation, celui de la lumière transmise à travers des filtres colorés, les couleurs d'un écran plat (à cette occasion observer à l'œil avec une loupe de fort grossissement l'aspect de l'écran).

    - S'il fait beau, vous pouvez comparer le spectre du soleil (voir travail préparatoire) au spectre mesuré. A quoi correspondent les absorptions que vous observez dans ce spectre ?

    - Comparer les spectres des néons obtenus en Scope et Relative Irradiance. Que pensez-vous de la lumière émise par la lampe à incandescence ?

- Vous remarquerez ici que beaucoup de choses vous sont proposées et que peu de questions sont explicitement posées. Il faut cependant qu'un maximum de mesures apparaisse dans votre compte rendu et que ces mesures soient commentées. Faites des comparaisons entre les spectres et exercez votre esprit « scientifique » pour faire des conclusions.

IV.3. Spectre de réflectance

Ce mode va permettre de mesurer la réflectance R(λ) d'un objet en fonction de sa longueur d'onde, et donc de caractériser sa couleur indépendamment de la source qu'il l'illumine. Pour cela on enregistre 2 spectres, l'un correspondant à celui de la source, l'autre à celui de la lumière diffusée. Plutôt que d'enregistrer directement le spectre de la source en plaçant la fibre optique en face, il est plus commode d'enregistrer le spectre diffusé par une surface blanche (bristol) placé juste devant l'objet que l'on veut caractériser : se placer en mode S (« Scope »), placer la fibre face au bristol, vérifier que le signal est inférieur à 4000 (sinon diminuer le temps d'exposition ou reculer la lampe). Eteindre la lampe et enregistrer le spectre correspondant (Store Dark Spectrum), puis rallumer la lampe et enregistrer le spectre réfléchi par la surface blanche (Store Reference Spectrum) ; passer ensuite en mode R « Reflection », afin d'observer normalement un spectre plat correspondant à 100% de réflectance pour toutes les longueurs d'onde. Enlever le bristol blanc, on observe alors R(λ).

- ❖ Caractériser alors la couleur des papiers colorés.
- ❖ Quelles sont les longueurs d'onde absorbées, quelles sont les longueurs d'ondes diffusées ?

V. Sensibilité spectrale des canaux RVB de l'appareil photo

On cherche à connaître ici la sensibilité de l'appareil photo en fonction des longueurs d'onde. Pour cela, l'idéal est d'avoir une source monochromatique ayant la même intensité pour toutes les longueurs d'onde. En faisant des photos avec le même temps de pose, la quantité de signal nous donnerait immédiatement la sensibilité en fonction de la longueur d'onde. Ici, grâce à des filtres de bande passante relativement étroite, on va se construire une série de rayonnements colorés relativement monochromatiques. Par contre, l'intensité du signal ne sera pas la même selon les longueurs d'onde. Pour déterminer l'intensité de chaque rayonnement, on utilisera le spectromètre USB dans son mode « Relative Irradiance ».

- Pour réaliser cette mesure on prépare une série de rayonnements colorés relativement monochromatiques au moyen d'une lampe blanche filtrée par des filtres de bande passante relativement étroite. Ce rayonnement monochromatique éclaire un bristol blanc, et on enregistre le spectre de ce rayonnement au moyen du spectromètre fonctionnant en mode « Relative Irradiance » (cf §III-2). Il est important que la fibre optique garde la même position pour que les mesures de spectre soient comparables.

- Noter la longueur d'onde λ_0 du maximum de la bande, l'intensité $I(\lambda_0)$ et sa largeur $\Delta\lambda$, puis calculer le produit $I(\lambda_0)\times \Delta\lambda$ qui donne approximativement l'intensité intégrée $<P(\lambda_0)>$ du rayonnement pour cette couleur.

- On photographie le bristol éclairé en plaçant l'appareil photo à un endroit fixe de façon à ce que la prise de vue s'effectue toujours dans les mêmes conditions, en choisissant le mode manuel (« M ») avec une valeur de l'ouverture fixée une fois pour toutes, de façon à légèrement sous exposer les photos (sinon, des zones sont systématiquement surexposées). Bien noter à chaque fois la valeur du temps de pose, T_{pose}. **Vérifier que vos photos ne sont pas saturées dans aucune des trois couleurs immédiatement.** Si c'est le cas, diminuer le temps de pose jusqu'à obtenir une photo non saturée dans chacun des calques RVB.

- Analyser les photos numériques obtenues au moyen du logiciel GIMP : pour chaque image correspondant à une valeur de λ_0 décomposer l'image obtenue suivant ses 3 couleurs RVB de base (ou composantes). Puis mesurer pour chaque composante le niveau de gris moyen au centre du spot éclairé (sélectionner un rectangle et « information –histogramme »).

- Enfin, pour chaque composante RVB, tracer le graphique :

$$\frac{\text{Niveau de gris moyen}}{< P(\lambda_0) > T_{pose}} \text{ en fonction de } \lambda_0.$$

Interpréter ces courbes.

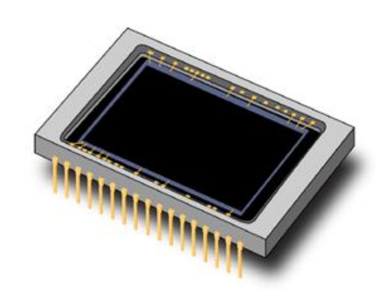
Etude n°7 :
Le capteur CDD

Attention, penser à éteindre l'appareil photo quand vous ne l'utilisez pas de manière à ne pas tomber en panne de batterie !!!

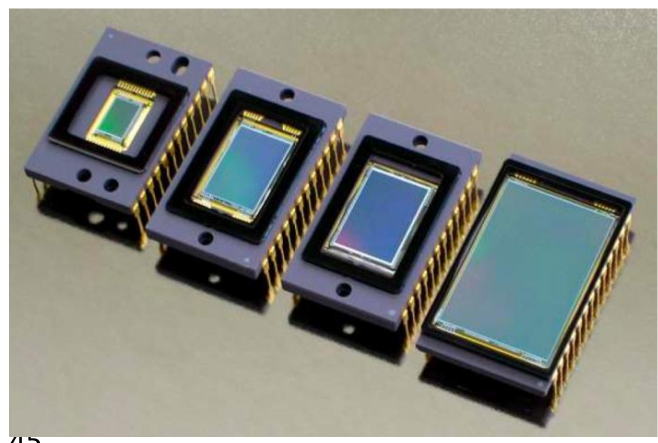
Rendre une version imprimée du compte rendu rédigé sur ordinateur, plus les images séparément en version électronique.

I. INTRODUCTION SUR LA TAILLE DES PIXELS

Les appareils photos numériques sont tous équipés d'un capteur numérique. Il est « l'équivalent » de la pellicule sur les appareils argentiques. **C'est le capteur numérique qui « capte » la lumière lorsque la photo est prise.**



Le capteur possède une "résolution spatiale" exprimée en Pixels. C'est la première chose qui est mise en avant sur un appareil photo numérique. En effet, de nombreuses personnes pensent qu'un appareil doté d'un capteur de 10 Mpx fera de meilleures photos qu'un 6 Mpx. C'est d'une logique implacable car, plus il y a de pixels, plus la photo est détaillée. Ce que l'on ne vous dit pas c'est que sur une photo 10x15, l'œil humain est incapable de faire la différence entre une photo prise en 3 Mpx ou à 10 Mpx... Alors oui, si vous faites des agrandissements, ou alors des recadrages, vous obtiendrez une photo détaillée avec votre appareil 10 Mpx que vous n'aurez pas avec votre 6 Mpx. **Si vous ne faites jamais de recadrage, ni d'agrandissement, un 6 Mpx peut être suffisant.** Un appareil proposant une très haute définition ne garantit pas d'avoir de belles photos, c'est une idée reçue ! C'était vrai au tout début lorsque les appareils faisaient moins de 3 Mpx.



Une autre caractéristique importante des capteurs est leur taille. Cela a des conséquences sur les aberrations et également sur la sensibilité de l'appareil photo. En effet, plus les photosites seront petits, moins ils recevront de lumière et plus le temps de pose devra être allongé (à condition de ne pas

saturer en électrons ces photosites, car les puits ont une certaine capacité). Les tailles standards des capteurs CCD s'étendent de 5,1x3,8 mm^2 pour un téléphone portable ou un compact, à 36x24 mm^2 pour un reflex, ce qui est équivalent à la taille des pellicules des anciens appareils photos. Il apparaît qu'un capteur mesurant 24 x 36 mm donnera une image plus nette s'il utilise des pixels proches de 9 microns. En effet, plus petits, le système électronique perd sa capacité à capturer les photons et génère plus de bruit. Beaucoup d'appareils photo numériques ont des capteurs de la taille 23,6x15,8 mm^2. C'est le cas des appareils photos numériques utilisés en TP.

Dans le paragraphe suivant, nous allons essayer de mesurer la taille des pixels.

II. MESURE DE LA TAILLE DES PIXELS

Pour déterminer la taille des pixels, aucune expérience n'est nécessaire dans notre cas. En effet, nous connaissons la taille du capteur et leur nombre, tous les deux indiqués dans la notice. A partir de ces données, il est très facile de calculer la taille des pixels. A vous de jouer.

Si nous ne connaissons pas la taille des capteurs, en ouvrant une image nous pouvons savoir quel est le nombre de pixels contenus dans cette image. Il reste à faire une photo, d'un quadrillage, d'un objet de taille connue, à une distance connue et avec une focale connue pour déterminer la taille du capteur.

Prenez une photo en mode autofocus d'une feuille de format A4 à une distance de 1, 2 et 3 m à l'aide de votre appareil photo. Répétez l'opération pour différentes focales. A l'aide de l'optique géométrique, déterminer pour chacune de vos photos la taille de l'image de la feuille sur le capteur. En visualisant l'image à l'aide de Gimp, déterminer pour chacune des images le nombre de pixels que cela représente sur votre photo. En déduire la taille des pixels. Comparer à la valeur réelle et critiquer cette méthode (quelles sont les limites et les hypothèses).

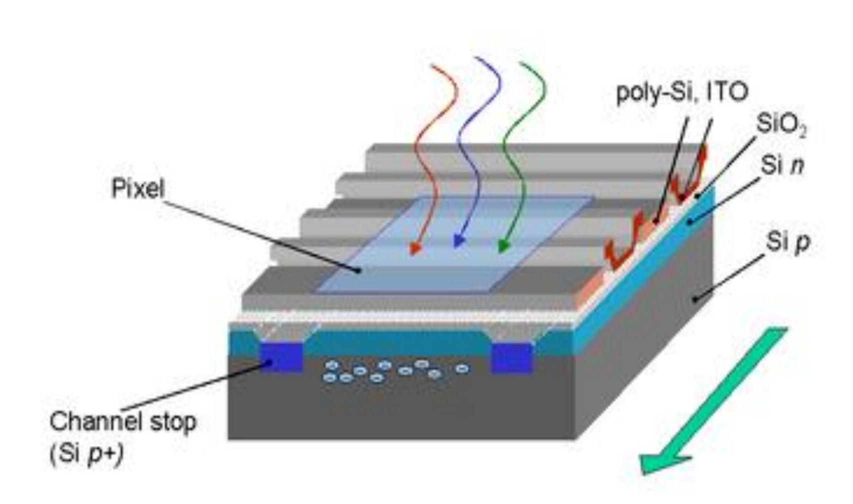
III. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR CCD

Deux grandes catégories de capteurs sont utilisées dans les appareils photo numériques :

- Les capteurs dits « CMOS »
- Les capteurs « CCD »

Seuls les capteurs CCD, « capteur à charges défilantes » seront décrits ici, car les appareils photo numériques utilisés en TP sont équipés de ce type de capteur.

Le CCD est un composant électronique de la technologie MOS (Métal Oxyde Silicium). Le principe du CCD est de convertir des photons en électrons dans une matrice de photosites ou de pixels. La lecture de l'image est effectuée photosite par photosite, en série.

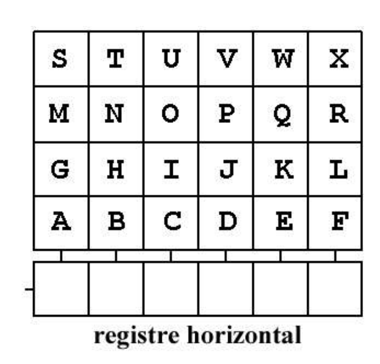


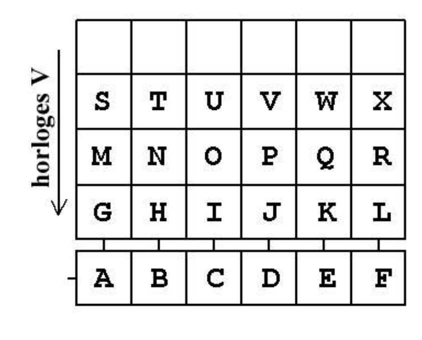
Chaque photosite fonctionne sur la base de l'effet photo-électrique. Lorsqu'un photon incident arrive sur la surface du photodétecteur avec une énergie suffisante, un électron est émis. Cet électron est stocké dans un puits qui contient environ 100 000 électrons. Le nombre total d'électrons qui peut être stocké est appelé contenance du puits (*« well capacity »*).

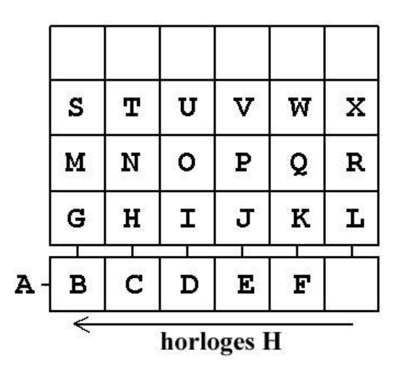
Il faut ensuite pouvoir connaître, pour chaque photosite, le nombre d'électrons stockés qui est donc proportionnelle à l'énergie lumineuse reçue par le photosite. C'est l'étape de lecture du signal. Dans la figure ci-dessous, chaque photosite de la matrice a reçu une certaine quantité de lumière et généré des électrons notés par des lettres de l'alphabet. La sortie des électrons est constituée de deux étapes importantes :

1. Le transfert vertical (cf. figure du milieu) transfère toutes les charges d'une ligne vers le bas dans une ligne, masquée à la lumière, appelée registre horizontal.

2. Le transfert horizontal (cf. figure de droite) transfère toutes les charges du registre horizontal d'une colonne vers la gauche.







Les images sont ensuite enregistrées sous la forme d'une matrice de valeurs de niveaux de gris (voir l'étude N°5) compris entre 0 et 4096. Cela correspond au format NEF (RAW) de l'appareil photo. Lorsque nous travaillons avec le format compressé JPEG 24 bit, chaque couleur est échantillonnée sur 8 bit donc de 0 à 255. Il y a donc une perte d'information. Lorsque l'intensité de la lumière éclairant une scène baisse, de moins en moins de lumière parvient aux photodétecteurs de l'appareil photo et la valeur du niveau de gris moyen décroît jusqu'à devenir nulle, auquel cas l'image est totalement noire et on ne distingue plus rien. Pour obtenir un niveau de gris observable on augmente le temps d'exposition, et éventuellement la sensibilité ISO. En fait la qualité de l'image tendant alors à baisser, on voit apparaître des fluctuations importantes de pixel à pixel, manifestation dans ce cas particulier d'un phénomène courant en physique qu'on appelle « bruit ».

C'est ce que l'on va chercher à mieux comprendre et caractériser dans le paragraphe suivant.

IV. PARTIE A PREPARER

- ❖ Rappelez, ou trouvez sur internet, le principe de l'effet photoélectrique : refaites vous-même un schéma et réécrivez quelques explications simples (**ne faites pas de copié-collé de ce que vous trouvez !!!**).

La capacité des puits des photosites est très importante vis-à-vis du bruit. En effet, pour N électrons contenus dans un puits, on observe pour un éclairement uniforme des fluctuations d'amplitude de l'ordre de $\sqrt{N}$ d'un photosite à l'autre. Cela signifie que lorsque le nombre d'électrons augmente dans le puits, le signal augmente proportionnellement à N, le bruit augmente proportionnellement à $\sqrt{N}$ et le "rapport signal sur bruit" augmente comme N / $\sqrt{N}$ = $\sqrt{N}$. Plus la zone sera claire, moins le bruit sera visible et inversement, plus les zones seront sombres, plus le bruit sera visible.

- ❖ Prenons quelques exemples. Considérons que la capacité du puits est de 100 000 électrons et que la photo peut être divisée en trois zones où la lumière est homogène. Dans la première zone, les puits sont remplis autour d'une valeur moyenne de 3000. Dans une deuxième zone, les puits sont remplis à 50 000 et dans la dernière zone autour de 99 000.

- ❖ Calculer l'amplitude des fluctuations du nombre d'électrons auquel on peut s'attendre dans les trois zones.

- En considérant que le signal est codé sur 8 bits (256 niveaux), peut-on les observer ?

V. ETUDE EXPERIMENTALE DU CAPTEUR CCD

V.1. Pixels morts et pixels chauds

Les pixels morts sont des pixels qui ne réagissent plus à la lumière ambiante. Quels que soient le temps de pose ou la sensibilité ISO de votre appareil photo, ils apparaissent toujours blancs (c'est-à-dire saturés en nombre d'électrons).

Les pixels chauds sont des pixels qui ont une sensibilité plus grande. Leur niveau est toujours supérieur aux pixels adjacents. Ils apparaissent rouges, rosés. Leur teinte dépend de la sensibilité et du temps de pose.

- Repérer les pixels morts et/ou chaud de votre appareil photo : faire 2 ou 3 photos **avec le capuchon**, avec différentes sensibilités et un temps de pose de 30 s. Observer un coin de la photo en grossissant énormément l'image afin d'observer et localiser ces pixels chauds. Noter leur nombre et montrer un exemple dans votre compte-rendu.

V.2. Fonction réduction du bruit de fond

Dans les appareils photo numériques, vous avez presque tout le temps une fonction de réduction du bruit de fond. Selon les appareils, ces options ne font pas toutes la même chose. Nous allons nous intéresser uniquement à celle de l'appareil photo que nous utilisons en TP.

- Prenez une photo, **toujours avec le capuchon** et repérer plusieurs points chauds. Refaites la même photographie en ayant activé la fonction réduction du bruit de fond. Comparez les deux photos. Que fait cette fonction ?

Attention, il ne faut pas laisser brancher l'appareil photo sur l'ordinateur.

V.3. Bruit et échelle iso

Enlever la réduction de bruit de fond.

L'un des avantages des appareils photo numériques est la possibilité de pouvoir changer très facilement d'échelle ISO. Pour les argentiques, il fallait changer la pellicule

photo. En augmentant la sensibilité, il est possible de faire des photos avec des temps de pose courts même dans des conditions de lumière faible. Cependant cela a un impact direct sur le bruit. Pour augmenter la sensibilité, on amplifie, avant la conversion analogique digitale, la charge électrique correspondant aux électrons stockés dans les différents puits. Par exemple, supposons que la capacité du puits soit de 100 000 électrons et que le convertisseur code sur 256 niveaux. Pour une sensibilité de 100 ISO, un pixel contenant 100 000 électrons sera enregistré après conversion analogique-numérique suivant le nombre maximal 255. Lorsque la sensibilité sera de 200 ISO, la charge provenant du puits sera doublée avant conversion, de telle sorte que si le puits n'est rempli qu'à 50 000 électrons le convertisseur en verra en fait 100 000 et la valeur du pixel sera encore 255, et restera saturée à 255 si le puits contient plus de 50 000 électrons.

Il se trouve que lorsqu'on double la charge, on double également l'amplitude des fluctuations de pixel à pixel. Une image à haute sensibilité (au centre de l'image ci-dessous) est donc granuleuse et assez « laide » car elle correspond à des pixels ayant reçu pour le même niveau de gris moins d'électrons qu'à bas ISO et donc le signal / bruit est plus petit qu'à bas ISO ; pour limiter ce phénomène, on peut «lisser» la photo, mais sa résolution se dégrade et on voit moins les détails (à droite).



On va maintenant étudier expérimentalement comment le bruit évolue avec l'ISO.

- Prendre, en mode priorité à l'ouverture A, des photos d'une feuille blanche éclairée uniformément avec un réglage ISO allant de 100 à Hi1 (ISO 3200). Enlever l'autofocus (sélecteur situé sur l'objectif de l'appareil photo) et régler l'appareil de manière à ce que la photo soit floue. Le but est de pouvoir faire l'hypothèse que, sur une petite zone de la photo, chaque pixel reçoive la même quantité de lumière. Ouvrir les images avec gimp.
- Pour chacune des photographies sélectionner un petit rectangle d'environ 100 pixels de côté et affichez l'histogramme : à chaque fois relevez la valeur moyenne et la déviation standard.
- Vérifiez que les valeurs moyennes sont proches (au fait, pourquoi devraient-elles l'être ?).
- Relevez le temps de pose, T, pour chacune de vos photos.

- ❖ Tracer le temps de pose en fonction de l'ISO.
- ❖ Tracer la déviation standard en fonction de l'ISO.
- ❖ Qu'observe-t-on ? Interprétez.

V.4. Bruit et quantité de signal

Lors de toute expérience, on cherche à améliorer la qualité des données, c'est-à-dire à limiter les sources de bruit de l'expérience. Ici, nous allons encore prendre en photo une feuille de papier blanc uniformément éclairée avec différents temps de pose. Ceci va changer à chaque fois la quantité de signal qui arrive sur la CDD. Lorsque le temps de pose sera court, les puits seront faiblement remplis. Lorsque le temps de pose sera long les puits des différents pixels seront remplis.

- ❖ Comment le bruit va-t-il évoluer ?

Les constructeurs des appareils photo font de leur mieux pour que l'utilisateur ne soit pas gêné par le bruit. Pour cela, différents traitements sont appliqués aux données ce qui nous empêche d'étudier facilement le bruit.

- ❖ En mode manuel M, prendre une série de photos à l'ISO 1600 d'un mur blanc, ou d'une feuille blanche avec un éclairage uniforme en faisant varier le temps de pose afin d'obtenir des images sous-exposées à surexposées. Comme pour l'expérience précédente, le réglage de l'appareil doit être tel que l'image est floue. Si vous avez le temps, répéter cette opération à différents ISO (400 et 100).
- ❖ Ouvrir les images avec gimp. Sélectionner un petit carré (100x100 environ) sur chacune des photographies et affichez l'histogramme. Relever la valeur moyenne et la déviation standard pour vos différentes photos.

En toute logique, la valeur moyenne devrait augmenter linéairement avec le temps de pose. Vous remarquerez que cela n'est pas le cas. Ceci est dû aux traitements d'image réalisés par l'appareil photo. Pour prendre en compte cette correction, on devra appliquer un facteur multiplicatif correctif K_i. Pour se faire, il faudra considérer la photographie la plus sous-exposée correspondant au temps de pose T_0. Pour une autre photographie i de temps de pose T_i, on définira le facteur correctif K_i par :

$$K_i = \frac{I_0}{I_i} \times \frac{T_i}{T_0}$$

où I_i est la valeur moyenne mesurée pour la photo i exposée avec le temps de pose T_i et I_0 la valeur moyenne mesurée pour la photo de référence de temps de pose T_0. On remarquera

que si le temps de pose double, la valeur moyenne devrait elle aussi-doublée et donc que K_i devrait être égal à 1 si aucun traitement n'était appliqué par l'appareil photo.

- Tracer $K_i \times I_i$ en fonction du temps de pose T_i (vous devriez trouver une droite !).
- On applique ensuite ce facteur correctif K_i sur la déviation standard σ_i afin d'obtenir une déviation standard corrigée σ_{cor-i} :

$$\sigma_{cor-i} = K_i \times \sigma_i$$

- Tracer σ_{cor-i}^2 en fonction du temps de pose T_i.
- Conclure

VI. QUESTIONS DE SYNTHESE

- Quelles sont vos critères de choix pour choisir votre appareil photo idéal ? Les expliquer selon votre mode d'utilisation de l'appareil photo (paysage, portrait, ...).
- Quel est l'intérêt d'utiliser de gros capteurs ?
- Est-il forcément pertinent d'avoir une carte 16 bits, 12 bits ou 8 bits pour quantifier les niveaux de remplissage des puits des différents photosites ?
- Est-il plus facile de corriger une photo légèrement surexposée (les pixels ne sont pas saturés mais la photo est très claire) ou une photo légèrement sous-exposée ?

Proposition de projets sur l'appareil photographique.

1. ***Dynamique d'une photo, du capteur au format de l'image. Jusqu'où peut-on pousser la sensibilité et la dynamique d'une photographie ? On pourra comparer l'argentique et le numérique, répondre au problème de photographier des scènes à grand contraste.***

2. ***Jusqu'où peut-on miniaturiser un appareil photographique (problématique, quelles sont les difficultés et les limitations) ?***

3. ***Etude d'un téléobjectif, transmission, distorsion, profondeur de champ. Illustrer ce thème sur les appareils photographiques à votre disposition et sur l'intérêt des téléobjectifs des paparazzis.***

4. ***Pouvez-vous contrôler la vitesse des voitures en ville avec l'appareil photo à votre disposition ? Comment faire ? Quelles sont les difficultés, et la précision de vos mesures ?***

5. ***Expliquer le problème des objectifs pour réaliser des photographies dans le mode macro.***

6. ***Pourquoi les photographies de mode sont réalisées avec des grands capteurs (6x6) ?***

7. ***Traitement d'images et montages photos. Principes de bases et illustrations.***

8. ***Comparez les performances en termes de sensibilité, de résolution et de dynamique des anciens appareils photos argentiques avec celles des appareils numériques.***